



**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA
BİLİMSEL ARAŞTIRMALAR**

Editör: Doç.Dr. Zafer Ömer ÖZDEMİR

yaz
yayınları

Kimya Mühendisliği Alanında Bilimsel Araştırmalar

Editör

Doç.Dr. Zafer Ömer ÖZDEMİR

yaz
yayınları

2026

**Kimya Mühendisliği Alanında Bilimsel
Araştırmalar**

Editör: Doç.Dr. Zafer Ömer ÖZDEMİR

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8574-74-6

Mart 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

**UV-Protective Food Packaging Using PVA Biocomposite
Films Containing Boron Nitride and Tea Waste:
Material Design and Mechanisms.....1**

Duygu KURU

**Adsorpsiyon Prosesinde Aktif Karbon Kullanılarak
Boyar Madde Giderim Koşullarının
Değerlendirilmesi26**

Ayşenur GÜMÜŞ, Adnan ALDEMİR, Ali Rıza KUL

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

UV-PROTECTIVE FOOD PACKAGING USING PVA BIOCOSMPOSITE FILMS CONTAINING BORON NITRIDE AND TEA WASTE: MATERIAL DESIGN AND MECHANISMS

Duygu KURU¹

1. INTRODUCTION

1.1. UV Radiation and Its Impact on Food Quality

The shelf life of foods depends not only on their resistance to oxygen and moisture, but also on their exposure to light, especially ultraviolet (UV) radiation (Csapó et al., 2019). UV light can adversely affect food quality by promoting photo-oxidative reactions in sensitive components, leading to nutrient losses, flavor changes, and overall quality deterioration (Lima et al., 2018). Ultraviolet (UV) exposure accelerates the deterioration of food quality by promoting processes such as lipid oxidation, color fading, aroma degradation, and the loss of certain vitamins and nutrients (Sani et al., 2024). For this reason, packaging systems that provide UV-blocking or UV-barrier functionality are regarded as an important subcategory of active or protective packaging, as they play a direct role in preserving food quality during storage and distribution (Olewnik-Kruszkowska et al., 2025). Studies on UV-blocking films clearly demonstrate the photochemical reactions caused by UV light in foods and the role of UV-barrier packaging in extending shelf life (Le et al., 2025; Kumar et al., 2022; Tripathi et al., 2024). In the literature, UV

¹ Associate Professor, Bilecik Seyh Edebali University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, TR, 11100 Bilecik, Türkiye, ORCID: 0000-0002-9727-5785.

protection approaches are generally grouped under two main headings. The first approach is based on reducing the UV transmittance of the film by using additives that directly absorb UV light. The second approach involves extending the path of light within the film by adjusting the layer structure and filler design of the packaging, thus creating a scattering or tortuosity effect (Roy et al., 2024). This section presents a hybrid approach that aims to strengthen the second strategy with boron nitride (BN) and to naturally provide the first strategy with tea leaf phenolics.

1.2. Polyvinyl Alcohol (PVA) as a Matrix for UV-Protective Packaging

PVA (PVOH) is a polymer frequently preferred in packaging literature due to its high oxygen barrier properties and good film-forming characteristics. Thanks to these properties, it is used both in single-layer films and, more commonly, as a barrier coating or interlayer in multi-layer packaging structures (Barbato et al., 2023). Although PVA has a strong oxygen barrier, it is a hydrophilic polymer and readily absorbs moisture. In high relative humidity environments, this moisture sensitivity weakens its barrier properties. In reviews of packaging literature, this balance is explicitly discussed as the “high barrier high moisture sensitivity” paradox (Shen et al., 2021). Similar studies have shown that nanofillers and coating strategies are frequently used to improve the barrier performance of PVA (Huang et al., 2012; Park et al., 2023; Abdelrehim et al., 2025; Shen et al., 2021). These studies have also revealed that food simulants and high humidity conditions can significantly affect the barrier properties of PVA. Therefore, using PVA as the basic carrier matrix in UV-protective designs is a logical approach; however, to ensure UV

barrier functionality, PVA needs to be combined with natural UV absorbers and/or inorganic nanofillers (Schiessl et al., 2022).

1.3. Tea Waste as a Natural Source of UV-Absorbing Phenolics

Tea (*Camellia sinensis*) has a rich composition of polyphenols (especially catechins and theaflavins), alkaloids, and various phytochemicals. Thanks to these components, tea is considered a natural matrix with high antioxidant capacity (Wang et al., 2023).

In recent years, the literature on the utilization of tea leaves and tea waste has been expanding. Studies that treat black tea waste as a functional filler highlight the polyphenol-rich structure of tea leaves and the potential of these components to provide stabilization and functionality in composites. Although these studies have mostly focused on non-packaging polymers, the findings obtained regarding waste-based functional filler approaches offer a similar framework (Duan et al., 2016).

1.4. Role of Boron Nitride Nanosheets in Composite Film Design

BN nanosheets stand out among high-performance functional filler materials in polymer composites due to their chemically stable structures, high thermal conductivity, and electrically insulating properties (Yılmaz and Ay, 2022). In the context of packaging films, the role of BN is generally interpreted not so much as direct UV absorption, but rather as enhancing light scattering and contributing to barrier and mechanical properties by creating a tortuous diffusion pathway within the polymer structure (Wang et al., 2023). In some biopolymer systems, it has been reported that high UV barrier capability can be achieved while largely preserving film transparency with the addition of hBN nanosheets. This provides an important comparative example showing that BN can provide UV protection while

enhancing functionality without causing packaging opacity (Kuru et al., 2022). In this context, BN can be described as a complementary design component within a transparent PVA matrix that supports the UV light absorption effect of tea grounds; it enhances the protective effect by increasing light scattering and extending its path within the film.

1.5. Synergistic UV-Shielding Mechanisms in PVA/BN/Tea Waste Films

In UV-protective film research, two main trends generally stand out. One is the incorporation of UV-absorbing components, such as natural phenolics or plant extracts, into the polymer. The other is the modification of the film's structural properties with inorganic nanofillers, thereby improving barrier and optical performance via light scattering (Silva et al., 2023). The original contribution of this section is the proposal of a “dual UV shield” by combining these two trends in a single composite design.

This book chapter presents an original and integrative perspective on the design of sustainable, UV-protective food packaging materials by combining polyvinyl alcohol (PVA), boron nitride (BN) nanosheets, and tea waste-derived phenolic compounds within a single composite film system. The utilization of tea waste allows for the transformation of agricultural food residues into value-added products. In this section, tea waste is considered not as an ineffective filler but as a functional component that actively contributes to the UV protection mechanism. This chapter also provides an integrated perspective on the synergistic UV-shielding mechanisms arising from tea waste-derived phenolics and boron nitride nanosheets within a PVA matrix.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

Polyvinyl alcohol (PVA, Rokim) was used as the film-forming polymer matrix. Boron nitride (hBN, Bortek Boron Technologies and Mechatronic Inc., Turkey) nanopowder were employed as an inorganic nanofiller. Tea waste was obtained from household-consumed black tea leaves without the addition of sugar, milk, or lemon. To minimize compositional variability, tea waste was collected from the same tea brand (Caykur) and prepared using a consistent brewing procedure. In this composite system, glycerol was used as a plasticizer to reduce the brittleness of the PVA matrix and increase film flexibility. Distilled water was used as the solvent for all solution preparation steps. All materials were used without a purification process. Schematic illustration of the preparation of PVA/tea waste/BN composite films is given in Figure 1.

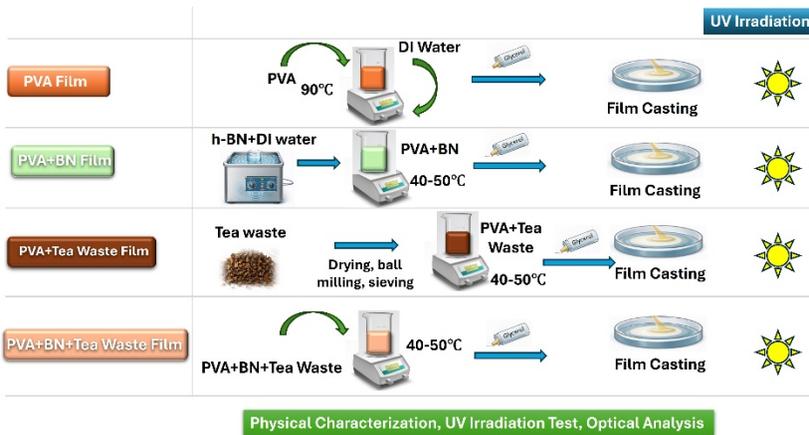


Figure 1. Schematic illustration of the preparation of PVA/tea waste/BN composite films.

2.2. Preparation of Tea Waste Powder

Tea waste was first washed with distilled water several times to remove some impurities and residual sugars. The washed

material was then dried in a laboratory oven at 60 °C for 24 h. After drying, the tea waste was ground using mechanical milling (Fritsch, Pulverisette 5/2). The resulting tea waste powder was stored in a dark and dry environment until further use.

2.3. Preparation of PVA Solution

An aqueous PVA solution (5 wt%) was prepared by dissolving the required amount of PVA in distilled water at 90 °C under continuous magnetic stirring. The solution was stirred for 1 hour until complete dissolution, and a clear, homogeneous solution was obtained. The PVA solution was allowed to cool to room temperature prior to the production of composites.

2.4. Dispersion of Boron Nitride Nanosheets

BN nanosheets were dispersed in distilled water using an ultrasonic bath for 30 mins to obtain a stable suspension. The BN content was adjusted to 0.5–1 wt% with respect to the PVA mass. The BN dispersion was then slowly added to the PVA solution under continuous stirring to ensure uniform distribution within the polymer matrix.

2.5. Incorporation of Tea Waste into the PVA/BN Matrix

Tea waste powder was pre-dispersed in distilled water using an ultrasonic bath for 10 mins to improve dispersion and prevent agglomeration. The dispersion was added dropwise to the PVA/BN mixture while stirring. The tea waste content was kept constant at 1 wt% relative to the PVA mass. The resulting mixture was further stirred for 30 mins to obtain a homogeneous composite solution.

2.6. Film Casting

The prepared composite solutions were cast onto clean Petri dishes using the solution casting method. The films were

dried at room temperature for 24–48 h. After complete drying, the films were carefully peeled from the petri dishes.

2.7. Control Samples

For comparative analysis, the following control films were prepared using the same approach: neat PVA film (PVA-0), PVA/BN composite film (PVA-BN), PVA/tea waste composite film (PVA-WTG), and PVA/BN/tea waste composite film (PVA-BN-WTG).

3. CHARACTERIZATION METHODS

3.1. Scanning Electron Microscopy (SEM)

The surface morphologies of the prepared films were examined using scanning electron microscopy (SEM, Zeiss, Supra50vp). SEM analysis was employed to evaluate the dispersion of boron nitride nanosheets and tea waste particles within the PVA matrix, as well as to identify possible agglomeration, phase separation, or structural defects induced by filler incorporation.

3.2. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Fourier transform infrared (FTIR, Agilent Technologies, Cary 630) spectroscopy was performed to investigate the chemical interactions between PVA, boron nitride nanosheets, and tea waste-derived components. Spectra were recorded in the range of 4000–400 cm^{-1} using the attenuated total reflectance (ATR) mode. FTIR analysis was used to identify characteristic functional groups of PVA and tea waste phenolics and to assess potential intermolecular interactions, such as hydrogen bonding, within the composite films.

3.3. UV–Visible Spectroscopy (UV–Vis)

The UV–visible light transmittance of the films was measured using a UV–Vis spectrophotometer (Agilent Technologies, Cary 60 UV–Vis) in the wavelength range of 200–800 nm. Particular emphasis was placed on the UV-A (320–400 nm) regions to evaluate the UV-shielding performance of the films. Changes in optical transparency and UV-blocking efficiency resulting from the incorporation of boron nitride nanosheets and tea waste were analyzed.

3.4. UV Degradation Test

The UV degradation behavior of the films was investigated by exposing the samples to UV irradiation for different durations (1, 3, and 5 days). Film specimens were placed at a fixed distance from the UV light source (Philips, 36 W, 1430 W/m², PLL-UV A, 315–380 nm) under controlled conditions. After UV irradiation, the films were analyzed by UV–Vis spectroscopy and FTIR to assess changes in optical properties and chemical structure. This test was used to evaluate the stability of the composite films under prolonged UV irradiation relevant to food packaging applications. In UV degradation testing, weight measurements were used to assess any loss due to UV radiation. The weights of the films before and after UV degradation were recorded, and the percentage weight loss was determined.

4. RESULT AND DISCUSSION

4.1. Structural and Morphological Properties of PVA-based Composites

Images of the resulting PVA-based composite films at different magnifications are given in Figure 2. The pure PVA film exhibits a relatively smooth and compact surface morphology. Submicron-sized voids and casting-induced delamination traces

observed across the surface are typical of PVA films produced by solution casting (Zheng et al., 2024). No significant phase separation or particle accumulation was observed; this represents the homogeneous initial structure of PVA (Uddin et al., 2012). BN-containing films exhibit a significantly rougher and more heterogeneous surface structure compared to pure PVA. Agglomerated, granular, and layered regions are clearly discernible on the surface (Behera et al., 2024). This morphology reveals that boron nitride nanosheets show a tendency to cluster locally within the polymer matrix (Adegun et al., 2025). In PVA films containing tea waste, a more uniform and balanced surface distribution was observed. The tea waste particles are well embedded in the matrix and relatively homogeneously distributed. The absence of large agglomeration regions indicates that the tea waste components have good interfacial compatibility with the PVA matrix (Quintero-Borregales et al., 2023).

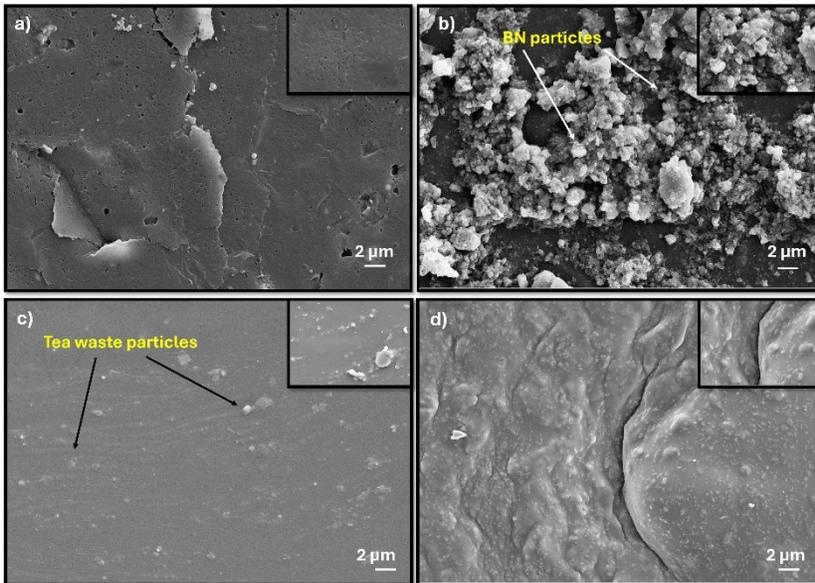


Figure 2. SEM micrographs of PVA-based films before UV irradiation: (a) PVA-0, (b) PVA-BN, (c) PVA-WTG, and (d) PVA-BN-WTG.

The hybrid composite film exhibits a more compact and integrated surface morphology compared to the film containing BN alone. It is observed that tea waste particles partially fill the voids between the BN nanosheets, resulting in tighter packing. This indicates that the surface heterogeneity caused by BN is partially balanced by the tea waste, and interphase interaction is enhanced (Yu et al., 2012).

In general, the SEM images show that the initial surface morphology of the films is closely related to the filler type. BN incorporation gives rise to a markedly rough and heterogeneous surface, whereas tea waste contributes to a more homogeneous distribution in the polymer matrix. When both fillers are used together, a more compact and integrated composite morphology is obtained. In pre-UV FTIR spectra (Figure 3), significant changes were observed in some bands depending on the filler type. Particularly noteworthy is the increased bandwidth and broader peak profile in the -OH stretching band, located in the 3200-3600 cm^{-1} range, in PVA-WTG and PVA-BN-WTG films containing tea waste. This change is explained by the interaction of phenolic -OH groups in the tea waste structure with hydroxyl groups in PVA chains via hydrogen bonds. The diversification of hydrogen bonding environments causes the -OH band to be observed as a wider band instead of a single, sharp peak (Bergo et al., 2012).

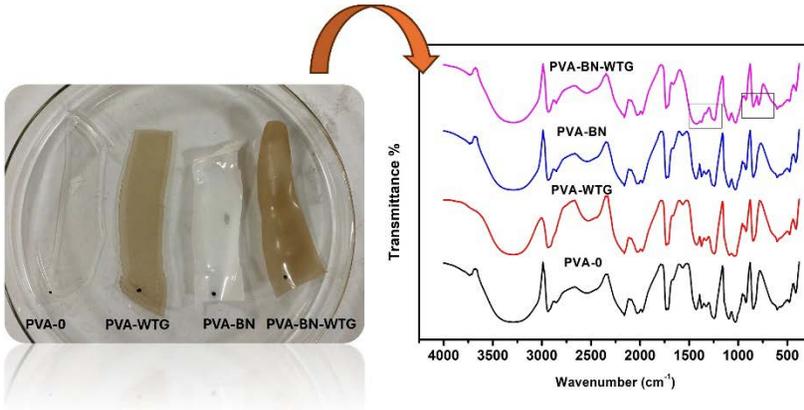


Figure 3. IR spectra of PVA-based composites before UV irradiation.

In addition, in the bands located in the $1000\text{-}1150\text{ cm}^{-1}$ range, corresponding to C-O and C-O-C vibrations, a significant increase in density and band overlap is observed in samples containing tea waste. This is due to the contribution of polysaccharides and aromatic components present in the tea waste structure to this vibrational region along with the PVA matrix (Nugrahani and Sundalian, 2020). These observed changes are considered to be an indication of increased interaction and compatibility between functional groups rather than the formation of a chemical bond between PVA and tea waste. In boron nitride-containing PVA-BN films, no significant shift in the positions of the characteristic PVA bands or the formation of new peaks was observed. This indicates that the BN nanosheets are primarily physically dispersed within the PVA matrix without altering the chemical structure. In hybrid PVA/BN/tea waste films, the observed changes in the -OH and C-O regions are largely related to the presence of tea waste, while BN indirectly influences these interactions.

4.2. UV-Degradation Test of PVA-based Composites

Figure 4 shows the UV-Vis spectra of the composite samples before and after UV irradiation. When the UV-Vis spectra of pure PVA films were examined, a slight but regular decrease in transmittance values was observed, especially in the 200-400 nm range, as the UV degradation time increased. In contrast, no significant change occurred in the visible region (400-800 nm). This indicates that limited chain breaking and the formation of new chromophore groups occurred in the PVA chains during UV exposure, but no significant photodegradation occurred in the overall structure of the material (Goliszek-Chabros et al., 2025). A significant decrease in transmittance was observed in PVA films containing tea waste, particularly in the UV region. This is attributed to the ability of phenolic and aromatic components in tea waste to absorb UV light (Yong et al., 2024). Specifically, the transmittance value in the UV-A region, at approximately 380 nm, showed a decrease of about 60% compared to pure PVA film, while no significant decrease appeared in the visible region. Films containing boron nitride exhibited very low transmittance values throughout the entire spectral range. However, this behavior is explained by the strong light scattering effect caused by boron nitride nanosheets, rather than complete UV absorption (Fu et al., 2015).

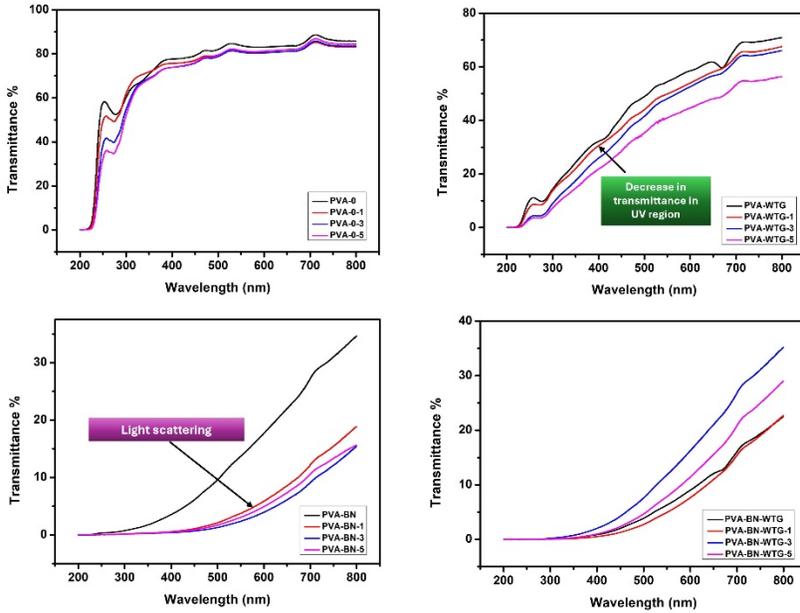


Figure 4. UV-Vis spectra of PVA-based composites before and after UV irradiation.

The increasing decrease in transmittance as the UV degradation time increases indicates that microstructural changes occurring at the matrix-filler interfaces increase light scattering. Triple composite films using tea waste and boron nitride together exhibited the lowest UV transmittance values among all samples. In these systems, the chemical UV absorption property of tea waste and the physical barrier and light scattering effects of boron nitride work together. The results show a significant synergistic effect between these two filler materials, and the films provide both high protection against UV light and exhibit controlled degradation behavior.

Table 1 shows the changes in film mass at different UV irradiation times. When weight changes depending on UV degradation time were examined, it was observed that mass loss increased with UV exposure in all samples.

Table 1. Changes in film mass at different UV irradiation times

Sample code	Before UV (g)	1 day UV (g)	decrease %	Before 3 days UV (g)	3 days UV (g)	decrease %	Before 5 days UV (g)	5 days UV (g)	decrease %
PVA-0	0.190	0.178	6.052	0.205	0.188	8.507	0.153	0.136	11.270
PVA-WTG	0.127	0.119	6.489	0.143	0.131	8.825	0.172	0.161	6.716
PVA-BN	0.161	0.148	8.297	0.187	0.167	10.921	0.145	0.124	14.423
PVA-BN-WTG	0.164	0.148	10.139	0.082	0.076	7.186	0.117	0.104	10.882

In the pure PVA (PVA-0) sample, the weight loss was 6.05% on day 1, rising to 8.51% on day 3 and 11.27% on day 5. This indicates that the PVA matrix exhibits limited resistance to UV radiation and that material loss increases with chain breaks as the exposure time lengthens (Vijayalakshmi and Madras, 2006). In the PVA-WTG sample containing tea waste, weight losses after 1 and 3 days of UV exposure were similar to those in pure PVA (6.49% and 8.83%). However, at the end of day 5, the mass loss was more limited at 6.72%. This result suggests that the aromatic and polyphenolic components in the tea waste may have a partially protective effect under long-term UV exposure as proved by UV spectrum analysis. In the PVA-BN sample containing boron nitride, mass loss depending on UV exposure time became more pronounced. The weight loss, particularly reaching 10.92% on day 3 and 14.42% on day 5, indicates that the interaction of BN nanosheets with the matrix under UV irradiation and the possible formation of microcracks can increase mass loss. This situation may be related to particle detachment accompanying matrix degradation at high UV doses in systems where BN is distributed as a physical filler (Rasul et al., 2021). In the PVA-BN-WTG sample where tea waste and boron nitride are used together, a more stable behavior was observed. Mass losses after 1 and 5 days of UV exposure were determined as 10.14%

and 10.88%, respectively, while a lower value of 7.19% was obtained on day 3. This result shows that the presence of tea waste can partially suppress the BN-induced degradation effects and create a more controlled degradation mechanism against UV within the composite structure. The FTIR spectra of PVA and composite films degraded under UV irradiation for different durations are shown in Figure 5.

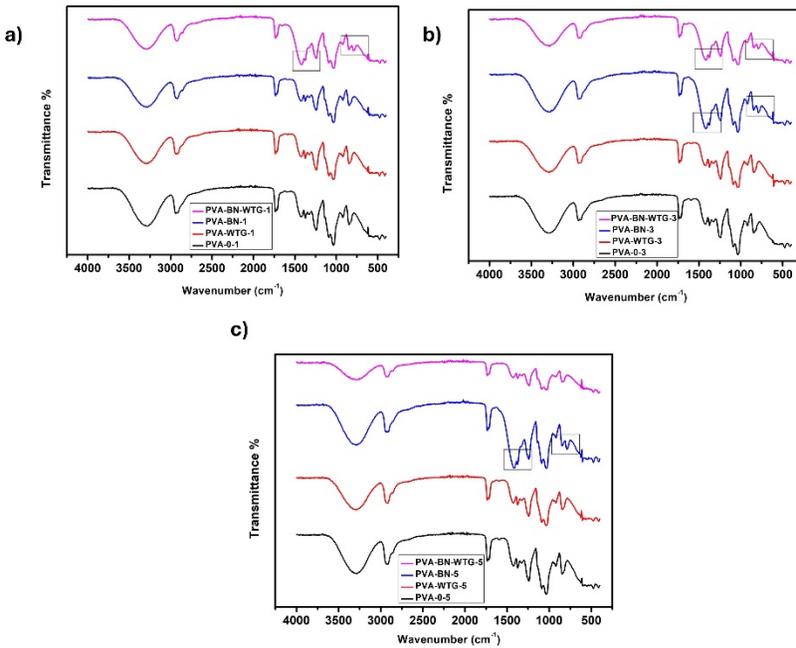


Figure 5. IR spectra of PVA-based composites after UV irradiation a) 1 day, b) 3 days, c) 5 days.

Figures a, b, and c show the spectra obtained after 1, 3, and 5 days of UV irradiation, respectively. The broad band observed in the range of 3200-3500 cm^{-1} in all samples corresponds to -OH stretching vibrations and is a characteristic feature of the PVA matrix (Hsiao et al., 2025). As the UV irradiation time increases, this band widens and its intensity changes, especially in the pure PVA sample. This can be attributed to chain breaking and the formation of new hydroxyl

groups under UV irradiation (El-Hefian et al., 2010). The peaks observed around 2920-2940 cm^{-1} correspond to aliphatic C-H stretching vibrations. A slight decrease in intensity is observed in these peaks with increasing UV exposure time, indicating partial degradation in the polymer chains (Nouh et al., 2025). The carbonyl (C=O) band, observed in the region of approximately 1720-1740 cm^{-1} , is a significant indicator of photo-oxidative degradation. This band becomes more prominent, particularly in the pure PVA sample, as the UV exposure time increases. This suggests that UV radiation causes oxidative reactions in the PVA chains, leading to the formation of new functional groups containing carbonyls (Hassan and Peppas, 2000). Bands observed in the range of 1000-1150 cm^{-1} correspond to C-O and C-O-C stretching vibrations. As UV exposure time increases, especially in the pure PVA sample, the shape of these bands changes and their intensity decreases. This change can be attributed to the cleavage and rearrangement processes occurring in the polymer chains (Bagchi et al., 2023).

In samples containing boron nitride, B-N stretching vibrations are observed around 1360-1380 cm^{-1} and B-N-B vibrations around 780-820 cm^{-1} (Weng et al., 2016). When comparing two spectra, one before (Figure 3) and one after UV radiation, the preservation of these bands after UV exposure indicates that BN nanosheets remain stable within the composite structure. Furthermore, the more pronounced presence of these bands, particularly in PVA-BN and PVA-BN-WTG samples, demonstrates the successful distribution of BN within the matrix. In samples containing tea waste, aromatic C=C vibrations in the 1500-1600 cm^{-1} range and bands originating from the lignocellulosic structure are observed. The preservation of these bands after UV exposure indicates that tea waste remains chemically stable within the composite structure (El-Azazy et al., 2022).

When comparing UV irradiation times, spectral changes are more pronounced in the pure PVA sample. In contrast, these changes are more limited in BN and tea waste-containing composites, suggesting that these fillers create a protective barrier effect against UV radiation. The high UV absorption capacity of boron nitride and the antioxidant properties of the phenolic compounds in tea waste may have contributed to making the composite structure more resistant to photo-oxidative degradation.

5. CONCLUSIONS

SEM analyses provided important information about the surface morphology of the prepared composite films. While the surface of the pure PVA sample showed a smoother and more homogeneous structure, it was observed that the fillers in the composites containing boron nitride and tea waste were dispersed within the matrix, and the surface roughness increased. This indicates that the fillers interacted with the polymer matrix, and the composite structure was formed. The UV stability and color preservation of the films were evaluated through combined optical, chemical, morphological, and gravimetric analyses. Despite the limitations of transmittance-based UV–Vis analysis for BN-containing films due to light scattering, consistent evidence from FTIR spectra, weight loss measurements, SEM observations, and visual inspection confirmed the enhanced UV resistance and color stability of BN-reinforced films. In general, the results show that UV degradation increases with time. The study revealed that the addition of tea waste could limit mass loss under long-term UV exposure, while the addition of boron nitride alone led to higher mass loss under UV conditions. The combined use of tea waste and boron nitride provided a structure that balanced these two effects, allowing the composite films to

exhibit more controlled behavior in terms of UV stability. FTIR results confirmed the characteristic functional groups of the PVA matrix and demonstrated the successful dispersion of boron nitride and tea waste within the composite structure. While changes observed in some bands after UV irradiation indicate limited photo-oxidative degradation in the polymer matrix, the less pronounced changes in the composite samples suggest that the additives enhance UV resistance. Gravimetric analysis results showed that a certain weight loss occurred in all samples with increasing UV exposure time. While the mass loss was observed to be higher in the pure PVA sample, it was determined that this loss was more limited in the composites containing boron nitride and tea waste. This result indicates that the composite films became more resistant to UV degradation thanks to the UV barrier effect of boron nitride and the contribution provided by the lignocellulosic structure of tea waste.

REFERENCES

- Abdelrehim, M., El Desouky, F. G., & Mohram, M. E. (2025). Multifunctional biodegradable polyvinyl alcohol/nanolignin composite films of optical, photoluminescence, antimicrobial properties and enhanced fruit preservation ability. *Scientific Reports*, 15(1), 39367.
- Adegun, M. H., Chan, K. Y., Zhang, H., Yang, Y., Zhao, X., Dong, X., ... & Kim, J. K. (2025). Enhancing the thermal conductivity and dielectric properties of polymer composite film through segregated boron nitride nanosheets. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 192, 108802.
- Bagchi, B., Datta, P., Fernandez, C. S., Xu, L., Gupta, P., Huang, W., ... & Tiwari, M. K. (2023). A stretchable, self-healing and semi-transparent nanogenerator for energy harvesting and sensing. *Nano Energy*, 107, 108127.
- Barbato, A., Apicella, A., Malvano, F., Scarfato, P., & Incarnato, L. (2023). *High-Barrier, Biodegradable Films with Polyvinyl Alcohol/Polylactic Acid+ Wax Double Coatings: Influence of Relative Humidity on Transport Properties and Suitability for Modified Atmosphere Packaging Applications*. *Polymers* 15: 4002.
- Behera, J., Patra, S., Nazrul, S., Sharma, S. K., Kumar, D., Verma, M. K., ... & Swain, S. K. (2024). Nano boron nitride laminated poly (ethyl methacrylate)/poly (vinyl alcohol) composite films imprinted with silver nanoparticles as gas barrier and bacteria resistant packaging materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(16), e55246.

- Bergo, P., Moraes, I. C. F., & Sobral, P. D. A. (2012). Effects of different moisture contents on physical properties of PVA-gelatin films. *Food Biophysics*, 7(4), 354-361.
- Csapó, J., Prokisch, J., Albert, C., & Sipos, P. (2019). Effect of UV light on food quality and safety.
- Duan, J., Reddy, K. O., Ashok, B., Cai, J., Zhang, L., & Rajulu, A. V. (2016). Effects of spent tea leaf powder on the properties and functions of cellulose green composite films. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 440-448.
- El-Azazy, M., El-Shafie, A. S., & Al-Saad, K. (2022). Application of infrared spectroscopy in the characterization of lignocellulosic biomasses utilized in wastewater treatment. In *Infrared spectroscopy-perspectives and applications*. IntechOpen.
- El-Hefian, E. A., Nasef, M. M., & Yahaya, A. H. (2010). The preparation and characterization of chitosan/poly (vinyl alcohol) blended films. *Journal of Chemistry*, 7(4), 1212-1219.
- Fu, Y., Huang, Y., Meng, W., Wang, Z., Bando, Y., Golberg, D., ... & Zhi, C. (2015). Highly ductile UV-shielding polymer composites with boron nitride nanospheres as fillers. *Nanotechnology*, 26(11), 115702.
- Goliszek-Chabros, M., Smyk, N., Xu, T., Matwijczuk, A., Podkościelna, B., & Sevastyanova, O. (2025). Lignin nanoparticle-enhanced PVA foils for UVB/UVC protection. *Scientific Reports*, 15(1), 35735.
- Hassan, C. M., & Peppas, N. A. (2000). Structure and applications of poly (vinyl alcohol) hydrogels produced by conventional crosslinking or by freezing/thawing methods. In *Biopolymers: PVA hydrogels, anionic*

- polymerisation nanocomposites* (pp. 37-65). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hsiao, K. Y., Chung, R. J., Chang, P. P., & Tsai, T. H. (2025). Identification of Hydroxyl and polysiloxane compounds via infrared absorption spectroscopy with targeted noise analysis. *Polymers*, 17(11), 1533.
- Huang, H. D., Ren, P. G., Chen, J., Zhang, W. Q., Ji, X., & Li, Z. M. (2012). High barrier graphene oxide nanosheet/poly (vinyl alcohol) nanocomposite films. *Journal of Membrane Science*, 409, 156-163.
- Kumar, L., Ramakanth, D., Akhila, K., & Gaikwad, K. K. (2022). Edible films and coatings for food packaging applications: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), 875-900.
- Kuru, D., Borazan, A. A., & Ay, N. (2022). Synthesis of boron nitride nanosheets/polyvinyl butyral thin film: an efficient coating for UV protection of extra virgin olive oil in glass bottles. *Journal of Nano Research*, 72, 37-51.
- Le, G. H., Thanh, D. A., Pham, T. T., Tran, Q. V., Dao, N. N., Nguyen, K. T., ... & Quan, T. T. (2025). UV-blocking and mechanically reinforced starch films incorporating Ce-UiO-66 nanoparticles for food packaging applications. *RSC advances*, 15(37), 30415-30426.
- Lima, F., Vieira, K., Santos, M., & de Souza, P. M. (2018). Effects of radiation technologies on food nutritional quality. *Descriptive food science*, 1(17), 10-5772.
- Nouh, S. A., Ellabban, M. A., Benthami, K. A., & Abbady, G. (2025). UV-Irradiation Effects on the Optical Properties of Polyvinyl Alcohol/Carboxymethyl Cellulose/Polyvinyl Pyrrolidone/Tin Chromium Disulphide Nanocomposite Films for their Application in Optoelectronic

Devices. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 64(8), 885-901.

- Nugrahani, I., & Sundalian, M. (2020). Chemometrical analysis of Fourier Transform Infrared Spectrum profile of Indonesia's black tea products (*Camellia sinensis* L.). *Biointerface Research In Applied Chemistry*, 10(1), 4721-4727.
- Olewnik-Kruszkowska, E., Vishwakarma, A., Wrona, M., Bertella, A., Rudawska, A., Gierszewska, M., & Schmidt, B. (2025). Comparative Study of Crucial Properties of Packaging Based on Polylactide and Selected Essential Oils. *Foods*, 14(2), 204.
- Park, N., Friest, M. A., & Liu, L. (2023). Enhancing the properties of polyvinyl alcohol films by blending with corn stover-derived cellulose nanocrystals and beeswax. *Polymers*, 15(21), 4321.
- Quintero-Borregales, L. M., Vergara-Rubio, A., Santos, A., Famá, L., & Goyanes, S. (2023). Black tea extracts/polyvinyl alcohol active nanofibers electrospun mats with sustained release of polyphenols for food packaging applications. *Polymers*, 15(5), 1311.
- Rasul, M. G., Kiziltas, A., Arfaei, B., & Shahbazian-Yassar, R. (2021). 2D boron nitride nanosheets for polymer composite materials. *npj 2D Materials and Applications*, 5(1), 56.
- Roy, S., Ramakrishnan, R., Goksen, G., Singh, S., & Łopusiewicz, Ł. (2024). Recent progress on UV-light barrier food packaging films—a systematic review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 91, 103550.

- Sani, M. A., Khezerlou, A., Tavassoli, M., Abedini, A. H., & McClements, D. J. (2024). Development of sustainable UV-screening food packaging materials: A review of recent advances. *Trends in food science & technology*, *145*, 104366.
- Schiessl, S., Kucukpinar, E., Cros, S., Miesbauer, O., Langowski, H. C., & Eisner, P. (2022). Nanocomposite coatings based on polyvinyl alcohol and montmorillonite for high-barrier food packaging. *Frontiers in Nutrition*, *9*, 790157.
- Shen, Z., Rajabi-Abhari, A., Oh, K., Yang, G., Youn, H. J., & Lee, H. L. (2021). Improving the barrier properties of packaging paper by polyvinyl alcohol based polymer coating—effect of the base paper and nanoclay. *Polymers*, *13*(8), 1334.
- Shen, Z., Rajabi-Abhari, A., Oh, K., Yang, G., Youn, H. J., & Lee, H. L. (2021). Improving the barrier properties of packaging paper by polyvinyl alcohol based polymer coating—effect of the base paper and nanoclay. *Polymers*, *13*(8), 1334.
- Silva, M. R., Alves, M. F., Cunha, J. P., Costa, J. L., Silva, C. A., Fernandes, M. H., ... & Ferreira, P. (2023). Nanostructured transparent solutions for UV-shielding: Recent developments and future challenges. *Materials Today Physics*, *35*, 101131.
- Tripathi, S., Kumar, L., Deshmukh, R. K., & Gaikwad, K. K. (2024). Ultraviolet blocking films for food packaging applications. *Food and Bioprocess Technology*, *17*(6), 1563-1582.
- Uddin, M. J., Chaudhuri, B., Pramanik, K., Middya, T. R., & Chaudhuri, B. (2012). Black tea leaf extract derived Ag nanoparticle-PVA composite film: Structural and

- dielectric properties. *Materials Science and Engineering: B*, 177(20), 1741-1747.
- Vijayalakshmi, S. P., & Madras, G. (2006). Photodegradation of poly (vinyl alcohol) under UV and pulsed-laser irradiation in aqueous solution. *Journal of applied polymer science*, 102(2), 958-966.
- Wang, K., Li, F., Sun, X., Wang, F., Xie, D., & Wei, Y. (2023). Transparent chitosan/hexagonal boron nitride nanosheets composite films with enhanced UV shielding and gas barrier properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 251, 126308.
- Wang, W., Le, T., Wang, W., Yu, L., Yang, L., & Jiang, H. (2023). Effects of key components on the antioxidant activity of black tea. *Foods*, 12(16), 3134.
- Weng, Q., Wang, X., Wang, X., Bando, Y., & Golberg, D. (2016). Functionalized hexagonal boron nitride nanomaterials: emerging properties and applications. *Chemical Society Reviews*, 45(14), 3989-4012.
- Yılmaz, Z., & Ay, N. (2022). Polietilen Nanokompozitlerde Nano Tabakalı Bor Nitrür (Bnns) Takviyesinin Biyobozunurluğa Etkisi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(2), 280-288.
- Yong, Y., Ahmad, H. N., Gu, Y., Zhu, X., Wen, Y., Guo, L., & Zhu, J. (2024). The synergistic effect of polyphenols and polypeptides for plant-based bioplastic film–Enhanced UV resistance, antioxidant and antibacterial performance. *Food Chemistry*, 460, 140746.
- Yu, J., Huang, X., Wu, C., Wu, X., Wang, G., & Jiang, P. (2012). Interfacial modification of boron nitride nanoplatelets for

epoxy composites with improved thermal properties. *Polymer*, 53(2), 471-480.

Zheng, W., Yang, D., Zeng, X., Liu, Q., Wang, C., Wu, X., ... & Zhang, Y. (2024). Utilization of the waste aqueous phase from tea residue hydrothermal carbonization for preparing active food packaging films. *Food Chemistry*, 448, 139141.

ADSORPSİYON PROSESİNDE AKTİF KARBON KULLANILARAK BOYAR MADDE GİDERİM KOŞULLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Ayşenur GÜMÜŞ¹

Adnan ALDEMİR²

Ali Rıza KUL³

1. GİRİŞ

Boya tanım olarak; alt tabakaya ince bir film halinde uygulanarak opak katı bir tabakaya dönüşen sıvı, sıvılaştırılabilir veya macun kıvamındaki kimyasal bileşimler olarak tanımlanmaktadır. İnşaat ve endüstriyel uygulamalarda koruma, dekorasyon, yüzey kusurlarını giderme ve ışık/ısı modifikasyonu gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Boyalar çözücülerde moleküler düzeyde çözünerek dağılırken, pigmentler çözünmeyip partikül halinde dağılır; boyalar daha parlak renk sağlamakla birlikte genellikle daha düşük ışık haslığına sahiptir.

Dünya genelinde yılda 100.000'den fazla türde 700.000 tonun üzerinde ticari boya üretilmekte; üretim ve kullanım süreçlerinde önemli miktarda boya atıksuya karışmaktadır. Üretim aşamasında yaklaşık %2, özellikle tekstil sektöründe kullanım sırasında ise yaklaşık %10 oranında boya çevreye salınmaktadır. Tekstil boyama işlemlerinden kaynaklanan

¹ Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 65080, Van, Türkiye, ORCID: 0000-0003-1861-7757.

² Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 65080, Van, Türkiye, ORCID: 0000-0001-9884-0961.

³ Dr. Öğr. Üyesi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, 65080, Van, Türkiye, ORCID: 0000-0001-9331-775X.

atıksular, kullanılmamış boyalar ve yardımcı kimyasalları içermekte olup toplam kirlilik yükünün %8–20'sini oluşturmaktadır. Mevcut arıtma sistemleri boyaların yalnızca yaklaşık yarısını giderebilmekte, bu nedenle her gün önemli miktarda boya alıcı ortamlara ulaşmaktadır. Sentetik aromatik yapıya sahip birçok boya toksik, alerjenik ve mutajenik etkilere sahiptir. Boyaların su ortamında oluşturduğu renk, yalnızca estetik bir sorun olmayıp ışık penetrasyonunu azaltarak fotosentetik ve biyolojik bozunma süreçlerini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle atıksulardan renk giderimi, suyun yeniden kullanımı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından küresel ölçekte çevresel, teknik ve ekonomik öneme sahip kritik bir konudur.

Adsorpsiyon tekniği, basit tasarımı, düşük başlangıç maliyeti ve minimum arazi gereksinimi nedeniyle son yıllarda atıksu arıtmada büyük ilgi görmüştür. Bu yüzey olayı, çözünen parçacıkları (adsorbatlar) yüksek gözenekli katı bir yüzeye (adsorbent) yoğunlaştırarak veya biriktirerek sudaki organik ve inorganik kirleticileri etkili bir şekilde giderir. Bu süreç, sıvı-katı moleküler çekim kuvvetlerine dayanır. Adsorpsiyon tabanlı ayırma teknolojisi, hacimsel sıvı fazından farklı bir adsorbe faz oluşturur. Denge izotermleri, adsorpsiyon davranışını temsil etmek, denge durumunda adsorban yükünü (q_e) ve adsorbat konsantrasyonu (C_e) ilişkilendirmek için gereklidir. Ek olarak, termodinamik ve kinetik parametreler adsorpsiyon sürecini anlamak için çok önemlidir. Adsorpsiyon iki türe ayrılabilir: adsorbat ve adsorban yüzeyi arasındaki elektrostatik etkileşimlere dayanan fiziksel adsorpsiyon ve aralarında güçlü bir kimyasal bağ oluşan kimyasal adsorpsiyon. Adsorpsiyon çalışmalarındaki temel parametreler arasında adsorban dozu, pH, temas süresi, sıcaklık, başlangıç konsantrasyonu bulunur.

2. KONU, KAPSAM VE LİTERATÜR ÖZETİ

Araştırmacılar, kirletici bağlama yetenekleri geliştirilmiş, düşük maliyetli adsorban malzemeler üretmek için yenilikçi yöntemler geliştirmektedirler. Yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip adsorbanlar üretmek için doğal malzemeler, tarımsal ve endüstriyel atıkları kullanmaktadır. Adsorpsiyon sürecinin etkinliği, kullanılan adsorban malzemelerin türüne büyük ölçüde bağlıdır ve yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi, daha iyi adsorpsiyon kapasitesine yol açmaktadır. Adsorpsiyon teknolojisinde çeşitli malzemeler kullanılmaktadır ve tatmin edici sonuçlar elde etmek için hammaddelerin yüksek adsorpsiyon kapasitesi göstermesi gerekmektedir. Küçük gözenek çapı, yüksek termal mukavemet ve aşınma direnci gibi faktörler, adsorpsiyon kapasitesinin artırılmasında çok önemlidir.

Artan endüstriyel ve tarımsal faaliyetler sonucu ortaya çıkan su kirliliği, özellikle tekstil, plastik ve boya endüstrilerinden kaynaklanan sentetik boyalar nedeniyle çevresel ve halk sağlığı açısından önemli bir sorundur (Gupta, 2009; Ventura-Camargo, 2013; Kyzas, 2013). Toksik ve kanserojen etkileri bildirilen bu bileşikler (Crini, 2006; Kyzas, 2014), su ortamında ışık geçirgenliğini azaltarak fotosentetik aktiviteyi de olumsuz etkilemektedir (Ferreira, 2014). Boyar madde gideriminde koagülasyon, kimyasal oksidasyon, membran ayırma ve biyolojik prosesler gibi çeşitli yöntemler uygulanmakla birlikte (Jawad, 2018), yüksek maliyet ve sınırlı verim gibi dezavantajlar nedeniyle adsorpsiyon yöntemi daha etkili ve ekonomik bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Sulak, 2007; Yagub, 2014).

Desorpsiyon, adsorplanmış taneciklerin yüzeyden ayrılması sürecini ifade ederken; yüzeye tutunan türler adsorbat, tutunmanın gerçekleştiği katı faz ise adsorbent olarak tanımlanmaktadır. İdeal bir adsorbentin çevre dostu, toksik

olmayan, ekonomik, geri kazanılabilir, kararlı ve yüksek yüzey alanına sahip olması beklenir. Son yıllarda gaz ve sıvı fazdaki kirleticilerin uzaklaştırılması amacıyla farklı adsorbentlerin kullanımına yönelik çok sayıda çalışma rapor edilmiştir (Zhang ve ark., 2014; Azizian ve ark., 2014). Yüksek karbon içeriği ($\leq 90\%$), geniş yüzey alanı ve karboksil, karbonil, lakton ve fenolik gruplar gibi fonksiyonel yapıları sayesinde aktif karbon, sentetik boya ların gideriminde en etkili adsorbentlerden biri olarak kabul edilmektedir (Zhang ve ark., 2014; Crini ve ark., 2019; Saleh ve ark., 2014). Adsorpsiyon performansı; hammadde özellikleri, aktivasyon yöntemi ve işlem parametrelerine bağlı olup (Bayrak ve ark., 2013; Yılmaz ve ark., 2019), biyokütle ve endüstriyel yan ürünlerden üretilen aktif karbonun su ve gaz arıtımında başarılı sonuçlar verdiği bildirilmektedir (Li ve Zhao, 2016; Njoku ve ark., 2014; Belala ve ark., 2011; Rambabu ve ark., 2015).

2.1. Aktif Karbon Üretim Aşamaları

Aktif karbon, sıvı ve gaz fazındaki organik bileşik leri adsorpsiyon yoluyla uzaklaştıran, yüksek yüzey alanı ve gelişmiş gözenekli yapıya sahip karbon esaslı bir adsorbenttir. Granüler, toz ve pelet formlarda üretilen aktif karbon; yüksek adsorpsiyon kapasitesi nedeniyle su ve gaz arıtımı başta olmak üzere arıtma, saflaştırma, kimya, eczacılık ve tekstil endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiziksel veya kimyasal aktivasyon süreçleriyle odun, kömür, turba, tarımsal kalıntılar ve lignoselülozik biyokütle gibi karbonca zengin hammaddelerden elde edilmekte; hammadde türü ve üretim koşulları ürünün yüzey kimyası, gözenek dağılımı ve performansını belirlemektedir.

Endüstriyel ölçekte aktif karbon üretimi çoğunlukla iki temel adımdan oluşur: karbonizasyon ve aktivasyon adımlarıdır. Karbonizasyon, öncül maddenin inert bir ortamda yüksek sıcaklıklarda (400–600°C) ısıtılması ve karbon içermeyen

elementlerin uzaklaştırılmasıyla karbon içeriğinin artırılmasını içerir. Bu işlemde, heteroatomlar içeren fonksiyonel gruplar ortadan kaldırılır ve sonuçta elde edilen malzemede karbon baskın hale gelir. Bu işlem, karbon oksidasyonunu ve aşırı gaz oluşumunu önler. Birçok çalışma, karbonizasyon işlemiyle yüzey özellikleri ve performansı iyileştirilmiş aktif karbon üretildiğini bildirmiştir. Sıcaklık, inert gaz akış hızı, ısıtma hızı ve bekleme süresi gibi çeşitli faktörler karbonizasyonu etkiler. Örneğin, karbonizasyon sıcaklığı yükseldikçe karbon içeriği de artar, ancak kül içeriğinin artması nedeniyle verimde düşüşe neden olur. Benzer şekilde, daha düşük ısıtma hızı, dehidrasyonun artması nedeniyle daha yüksek karbon içeriğine neden olur. Ayrıca, daha uzun bekleme süresi, karbon yapısında daha fazla gözenek oluşumunu sağlar.

2.2. Aktif Karbon Aktivasyon İşlemleri

Karbonizasyon aşamasının ardından, buhar ve CO₂ gibi gazlar kullanılarak (fiziksel işlem) veya oksitleyici/kurutucu maddeler kullanılarak (kimyasal işlem) aktivasyonu gerçekleştirilir. Bu aktivasyon aşaması, karbon malzemenin gözenekliliğini ve yüzey özelliklerini iyileştirmek için çok önemlidir. Fiziksel aktivasyon süreci genellikle oksijen yokluğunda 600 °C ila 1000 °C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşir. Bu aşamada, karbon malzeme yapısal yeniden düzenleme ve gözenek oluşumuna uğrar, bu da hem yüzey alanını hem de adsorpsiyon kapasitesini büyük ölçüde etkiler. Fiziksel aktivasyonu etkileyen faktörler arasında sıcaklık, aktivasyon süresi ve aktivasyon maddesi bulunur. Daha yüksek aktivasyon sıcaklıkları genellikle aktif karbonun gözenekliliğini ve yüzey alanını artırır. Ancak, aşırı yüksek sıcaklıklar gözeneklerin çökmesine neden olabilir. Aktivasyon sürecinin süresi, gözeneklerin ve yüzey alanının gelişimini etkiler; daha uzun süreler genellikle daha yüksek gözenekliliğe neden olur. Buhar veya CO₂ gibi kullanılan aktivasyon maddesinin türü, AC'nin

gözenek yapısını ve yüzey özelliklerini etkiler. Gözenek hacmi, gözenek boyutu, gözenek alanı/hacmi ve yüzey alanı gibi aktif karbonun yüzey özellikleri, kullanılan hammadde türüne ve üretim (karbonizasyon ve aktivasyon) koşullarına bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Örneğin, karbon malzemenin dış yüzeyindeki kenar gruplarının oksitlenmesi, 50 nm'den daha geniş makro gözenekler oluşturur. AC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri, hammadde ve üretim süreci, özellikle de aktivasyon türü tarafından büyük ölçüde etkilenir. Kömür bazlı karbon değişken bir makro gözenek ağı gösterirken, odun bazlı karbon ise büyük gözeneklerden oluşan tek tip bir ağ göstermiştir. Ayrıca, AC'nin N₂ yüzey alanı ve üretim veriminin, kullanılan hammaddenin doğasına büyük ölçüde bağlı olduğu da belirtilmelidir. Bu nedenle, daha yüksek yüzey alanına ve üretim verimine sahip AC'ler, kül içeriği daha yüksek hammaddelerden üretilebilir. Bunların yanı sıra, adsorpsiyon özelliği gözenek boyutu dağılımı ve gözenek hacmi gibi birçok faktörden de etkilenir. Genellikle, aktif karbonlar geniş gözenek boyutu dağılımına sahiptir.

Termal ve kimyasal aktivasyon yöntemleri, aktif karbon yüzeyindeki fonksiyonel grupların konsantrasyonunu ayarlamak için kullanılabilir. Termal ve kimyasal işlem için yaygın olarak kullanılan bazı maddeler arasında hidrojen peroksit (H₂O₂), dioksit, ozon ve amonyak bulunur. Aktif bölgeler toplam aktif karbon yüzey alanına önemli bir katkı sağlamasa da, yüzey kimyasında meydana gelen hafif bir dalgalanma adsorpsiyon kapasitesi üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir. Tipik olarak, aktif karbonlar hidrofobiktir, ancak aktif karbonun hidrofiliği, yüzeye oksijen içeren fonksiyonel gruplar eklendiğinde artma eğilimindedir ve bu durum su molekülleri aracılığıyla hidrojen-oksijen bağlarının oluşumunu kolaylaştırır. Kimyasal ve fiziksel aktivasyon yöntemleri birleştirilerek fizikokimyasal bir aktivasyon süreci oluşturulabilir. Bu genellikle kimyasal olarak

emprenye edilmiş ham bir öncülün karbonlaştırılmasını ve ardından fiziksel aktivasyonu içerir. Alternatif olarak, kimyasal olarak emprenye edilmiş kömürün oksitleyici gazlar veya buhar kullanılarak karbonlaştırılması ve aktive edilmesi de söz konusu olabilir.

Aktivasyon yönteminin seçimi öncelikle öncülün özellikleri ve elde edilen aktif karbonun hedeflenen özel uygulaması tarafından etkilenir. Endüstriyel ölçekte, piroliz sürecini iyileştirme ve mikrogözenekliliğin gelişimini daha iyi kontrol etme yeteneği nedeniyle genellikle fiziksel aktivasyon tercih edilir. Dahası, fiziksel aktivasyon yoluyla elde edilen aktif karbonlar, özellikle su arıtma uygulamaları için avantajlı olan kimyasal nötralizasyon gerektirmez. Bu, yalnızca üretim maliyetlerini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda çevresel kirliliği de en aza indirir. Üstün mekanik dayanımları, onları yüksek basınçlı kolon sistemlerinde kullanım için de uygun hale getirir. Buna karşılık, kimyasal aktivasyon, fiziksel aktivasyona kıyasla çeşitli avantajlar sunar. Genellikle daha düşük aktivasyon sıcaklıkları, daha kısa işlem süreleri ve daha az enerji gerektirirken, aynı zamanda daha yüksek yüzey alanına, daha büyük gözenek hacmine ve genel verimlilikte iyileşmeye sahip aktif karbonlar elde edilmesini sağlar. Bununla birlikte, bu avantajlar daha yüksek kimyasal ve işlem maliyetleriyle birlikte gelir. Kimyasal aktivasyon yoluyla elde edilen yüksek karbon verimi, daha düşük sıcaklıklarda çalışmaktan ve katran oluşumunu baskılayan aktifleştirici maddelerin dehidrasyon etkisinden kaynaklanmaktadır. Fiziksel aktivasyonun aksine, kimyasal yöntem, genel morfolojiyi büyük ölçüde korurken, düzgün mikrogözenek gelişimini teşvik eder. Buna karşılık, fiziksel aktivasyon daha heterojen bir gözenek ağı oluşturur, bu da daha büyük kütle kaybına ve dolayısıyla daha düşük verime yol açar. Son olarak, her iki yöntemin fizikokimyasal bir aktivasyon adımıyla birleştirilmesi, karbon matrisi içindeki

iyileştirilmiş kütle transferinin daha yüksek adsorpsiyon kapasitesine dönüşmesi nedeniyle, daha yüksek özgül yüzey alanına ve gözenek hacmine sahip aktif karbonlar üretir.

Endüstriyel ölçekte üretim karbonizasyon ve aktivasyon aşamalarından oluşmakta (Klasson ve ark., 2013; Gümüş vd., 2025b); hammadde mineral içeriği, gözenek yapısı ve yüzey kimyası adsorpsiyon verimini belirlemektedir (Ergin ve Gümüş, 2025; Cui ve ark., 2011; Prauchner ve ark., 2016). Adsorpsiyon süreçleri izoterm, kinetik ve termodinamik modellerle analiz edilmekte (Aldemir vd., 2019; Ngakou vd., 2019) ve istatistiksel doğrulamalar ile desteklenmektedir (Hadi vd., 2012; Ayawei vd., 2017; López-Luna vd., 2019; Benmessaoud vd., 2020).

2.3. Aktif Karbon Karakterizasyon Analizleri

X-ray difraksiyonu (XRD)

Başlangıçta, XRD diyagramında gösterilen morfoloji, aktif karbonun yapısındaki organizasyon veya rastgelelik düzeyi hakkında bir bilgi sağlar. Daha önce, 002 grafit yapısıyla ilişkili ve yaklaşık $2\theta = 26^\circ$ 'de bulunan, kısmen oluşmuş veya önemli ölçüde büyütülmüş, biraz elips şeklinde bir yansıma, aktif karbonun içinde birçok grafen benzeri katmanın istiflenmesini gösteriyordu. Şu anda, aktif karbon atomlarının "a" veya "c" yönlerinde kısa menzilli düzen sergilediği bilinmektedir; Scherrer denklemleri bu özelliği göstermeyi kolaylaştırır. Ayrıca, difraktogramın (002) ve (100) yansıma yoğunluklarını referans bir grafit ile karşılaştırarak, aktif karbonlardaki grafitizasyon derecesi değerlendirilebilir.

Termal analiz (TGA/DTA)

TGA/DTA eğrilerini kapsayan termal analiz, aktif karbon üretimi için seçilen bir maddenin tanıtılmasında literatürde hayati bir araştırma tekniği haline gelmiştir. Geleneksel bir TGA termogramındaki ilk ağırlık düşüşü, malzemenin 25 ila 150 °C

arasında ısıtılması sırasında nemin buharlaşmasıyla açıklanır. En büyük fark edilebilir ağırlık kaybı genellikle bir sonraki aşamada (150–400 °C) meydana gelir ve bu durum birincil karbonizasyon veya aktif pirolizi göstermektedir. Bu durum, katranların ve diğer uçucu bileşiklerin buharlaşmasıyla ortaya çıkar. Bu aşama, selülozun (270–400 °C) ve hemiselülozların (180–270 °C) ayrıştığı sıcaklıklara uyan iki faza ayrılır. Tipik olarak 400 ile 550 °C arasında meydana gelen üçüncü fazın başlangıcında, olağanüstü kararlılığıyla bilinen bir yapı parçalanır. 550°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çok az ağırlık kaybı olması, kömürün temel yapısının çimentolandığını göstermektedir. 550°C'de kütle kaybı ihmal edilebilir düzeydedir, bu noktada stabilize olur ve neredeyse sabit kalır. Bu aşamada, az miktarda selüloz kalıntısı olabilir ve atık hemiselüloz varlığını göstermektedir. Bu aşamada baskın bileşen lignindir ve ligninin ayrışması nispeten daha zordur. Ligninin parçalanmasının 200-900°C sıcaklık aralığında kademeli olarak gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

Elektron mikroskop ve ilgili ölçüm teknikleri

Ham maddelerin aktif karbonlara dönüştürülmesinde, ısı veya kimyasal işlemler malzemenin morfolojisini değiştirebilir. Bu değişiklikler genellikle SEM görüntülerinde görülebilir. İletim elektron mikroskobu (TEM) görüntüleri, hem geleneksel hem de modern kristal ve düzensiz malzemelerin kapsamlı bir temsilini sunar. Yüksek çözünürlüklü iletim elektron mikroskobu (HRTEM) ile elde edilen görüntüler, karmaşık nanoyapının yerleştirilmiş bir temsilini üretir. Aktif karbonların seçici alan elektron kırınımı SAED desenlerinde 001 grafit benzeri yansımaların yokluğu tipik bir gözlemdir. Bu, malzemenin nanoyapısının düzensiz grafit benzeri katmanlar içerdiğini gösterir, çünkü üç boyutlu grafit benzeri istiflemenin yokluğunu gösterir. İletim elektron mikroskobu (TEM) dışında, daha sık kullanılan iki ilgili yöntem X-ışını enerji dağılımlı spektroskopisi (EDS) ve elektron enerji kaybı spektroskopisi (EELS)'dir. EDS,

iç standartların uygulanmasıyla normalde %1 ila %5 arasında değişen ortalama hata payıyla nicel veriler sağlar. Bunun aksine, EELS, elektronların malzeme ile olan esnek etkileşimleri sırasında kinetik enerjilerindeki azalmayı ölçer. İncelenen alandaki her elementin benzersiz bir yapısı olduğundan, bu enerji kaybı onları tanımlamayı ve daha fazla inceleme yapmayı mümkün kılar. EELS ile elde edilen yerel kimyasal bileşimi ölçmek için bir dizi matematiksel yöntem kullanılabilir. Tipik teknikler, geçiş tepelerinin entegre bölgelerinden her element için iki temel özelliği çıkarmayı sağlayan pencere tabanlı yöntemlerin kullanılmasını içerir. Artık karbon ve oksijenin kesin konsantrasyonlarını ve her birinin içerdiği hibritleşme türlerini belirlemek mümkündür. Bununla birlikte, kimyasal bileşimi elde etmenin en kolay yolu dijital mikrograf programını kullanmaktır.

2.4. Aktif Karbonun Rejenerasyonu ve Yeniden Kullanılabilirliği

Aktif karbonun rejenerasyon kapasitesi veya verimliliği, boya atıklarının arıtılması için çok önemli bir husustur; çünkü adsorbanın yeniden kullanılması maliyet tasarrufu sağlayabilir ve çevresel sürdürülebilirliği koruyabilir. Sentezlenen adsorbanların yeniden kullanılabilirliği büyük ölçüde rejenerasyon verimliliğine bağlıdır. Rejenerasyon verimliliğinin ölçüsü, n. döngüden sonra rejenere edilmiş aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesinin, ilk döngüden sonraki aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesine bölünmesidir. Genel olarak, organik çözücüler, redoks ajanları, asitler ve bazlar ve çeşitli pH'larda gelişmiş oksidatif işlemler, kullanılan teknikler arasında güçlü rejenerasyon stratejileridir.

Kimyasal rejenerasyon teknikleri

Kimyasal rejenerasyon işleminde, adsorbatlar belirli çözücüler veya çözeltideki kimyasal maddeler kullanılarak veya adsorbe edilmiş türlerin kimyasal reaksiyonlar yoluyla

ayrışmasıyla desorbe edilir. Bu yöntem nispeten maliyetlidir ve verimliliği büyük ölçüde adsorbatların seçilen çözücülerdeki çözünürlüğüne bağlıdır. Ayrıca, adsorbanın kimyasal yapısını değiştirebilir. Düşük kaynama noktalarına ve sınırlı termal kararlılığa sahip organik adsorbanlar, kimyasal rejenerasyon için özellikle uygundur. Bu teknikte, hem inorganik hem de organik adsorbatların desorpsiyonunu artırmak için çeşitli inorganik ve organik çözücüler kullanılır.

Termal rejenerasyon

Doymuş adsorbanın kurutulmasını, inert bir atmosfer altında pirolizini ve buhar veya karbondioksit gibi oksitleyici gazlar kullanılarak artık organik maddelerin gazlaştırılmasını içerir. Piroliz aşamasında, adsorban inert koşullar altında 800 °C sıcaklığa maruz bırakılır ve bu işlem doymuş adsorban içinde hapsolmuş uçucu bileşikleri serbest bırakır. Pirolize edilmiş adsorban daha sonra 800 °C'de gazlaştırmaya tabi tutulur, kirleticileri oksitler ve adsorbanın orijinal özelliklerini geri kazandırır. Termal rejenerasyon, tükenmiş adsorbanları geri kazandırmak için yüksek sıcaklıklar kullanan enerji yoğun bir tekniktir ve bu durum onu diğer rejenerasyon yöntemlerinden daha maliyetli hale getirir.

Mikrodalga destekli rejenerasyon

Mikrodalga rejenerasyonu, yüklü parçacıklarla etkileşim yoluyla ısı üretmek için elektromanyetik enerjiyi kullanır. 300 MHz–300 GHz frekans aralığında çalışan, adsorban mikrodalga radyasyonu yoluyla ısıtılır ve adsorpsiyon dengesini bozar. Mikrodalga alanı altında, adsorban polar maddeleri emer, bu da hızlı dipol dönüşüne ve ısı üretimine yol açar. Biriken bu ısı enerjisi, desorpsiyon sürecini başlatır; bu yöntem, çeşitli kirleticilerle yüklü adsorbanları geri kazandırmak için etkili bir şekilde kullanılmıştır.

Mikrobiyal rejenerasyon

Mikrobiyal rejenerasyon, adsorpsiyonu biyolojik bozunma ile birleştirerek adsorbanları mikrobiyal aktivite kullanarak eski haline getiren bir tekniktir. Bu süreçte, mikroorganizmalar, besin maddeleri ve çözülmüş oksijen ile birlikte kirletici madde yüklü adsorban maddeye verilir ve bu da kirleticilerin desorpsiyonunu ve parçalanmasını kolaylaştırır. Bu süreç, ekzoenzimatik reaksiyonlar yoluyla gerçekleşir. Küçük boyutlu bakteri hücreleri, ekzoenzimleri çevre ortama salgılar ve bu da adsorban maddenin mezogözeneklerine yayılmalarını sağlar. Oluşan bozunma ürünlerinin adsorban maddeye karşı düşük bir afinitesi vardır; bu da desorpsiyonlarını ve ardından biyofilm içinde oksidasyonlarını teşvik eder. Bununla birlikte, bu yaklaşımın yavaş rejenerasyon hızı gibi bazı sınırlamaları vardır ve bu da onu büyük ölçekli uygulamalar için daha az uygun hale getirir. Ayrıca, bazı adsorban maddeler ve katyonik yüzey aktif maddeler mikroorganizmalar için toksik olabilir ve daha geniş kullanımını kısıtlar.

Elektrokimyasal rejenerasyon

Elektrokimyasal rejenerasyon, adsorbanların adsorpsiyon kapasitesini veya katalizörlerin aktivitesini geri kazandırmak için elektrik enerjisi kullanır. Bu teknik, iki elektrot, bir elektrolit ve bir güç kaynağından oluşan bir elektrokimyasal sistem içindeki bir elektrik alanının neden olduğu değişikliklerle çalışır. Bazı durumlarda, bölmeleri ayırmak için katot ve anot arasına bir membran yerleştirilir. Bu işlem iki adımda gerçekleşir: önce kirleticilerin desorpsiyonu ve elektro desorpsiyonu gerçekleşir, ardından elektrotlar ve adsorban yüzeyinde elektrokimyasal reaksiyonlar meydana gelir ve kirleticinin bozunmasına yol açar. Bu teknik, fenol, toluen ve p-nitrofenol gibi kirleticiler içeren çeşitli adsorbanlara başarıyla uygulanmıştır.

Magnetik geri kazanım kullanılmış adsorbanların doğrudan işlenmiş çözeltilerden eksiksiz ve hızlı bir şekilde geri kazanılmasını sağlayarak karmaşık filtrasyon veya santrifüjleme adımlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Özellikle manyetik aktif karbon kompozitler, daha kolay kullanım ve azaltılmış yapısal bozulma sayesinde, ardışık rejenerasyon döngülerinde daha yüksek adsorpsiyon kapasitelerini koruyarak manyetik olmayan muadillerine göre daha iyi performans gösterir. Bu yaklaşım, adsorban kütesini koruyarak minimum malzeme kaybını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ikincil kirlilik risklerini ve işletme maliyetlerini de düşürerek adsorpsiyon rejenerasyon döngüsünü hem çevresel olarak sürdürülebilir hem de ekonomik olarak avantajlı hale getirir. Manyetik fonksiyonelleştirmenin ötesinde, bir adsorbanın verimliliği, seçiciliği ve dayanıklılığı büyük ölçüde, hazırlama yöntemine bağlı olan içsel fizikokimyasal özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, bu hazırlama tekniklerinin ayrıntılı bir şekilde anlaşılması, belirli uygulamalar için yapıyı, yüzey kimyasını ve performansı optimize etmek için gereklidir. Geleneksel rejenerasyon yöntemleri adsorpsiyon kapasitesini geri kazandırmayı amaçlarken, verimlilikleri genellikle geri kazanım kayıpları ve ek işlem adımlarıyla sınırlıdır. Manyetik geri kazanım, kullanılmış adsorbanların doğrudan, hızlı ve eksiksiz bir şekilde ayrılmasını sağlayarak bu sınırlamaların üstesinden gelir ve böylece rejenerasyon sürecini kolaylaştırır.

Bu çalışma, Türkiye’de aktif karbon üretimine ilişkin akademik yayınları derleyerek üretim yöntemleri, ithalat-ihracat dengesi, tüketim dağılımı ve kullanım alanlarını bütüncül biçimde değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Türkiye’nin artan çevresel gereklilikleri ve su arıtma ihtiyacı dikkate alındığında, aktif karbon stratejik ve sürdürülebilir bir malzeme olarak önemini korumaktadır. Endüstride yoğun olarak kullanılan boyar maddelerinin aktif karbon ile en verimli şekilde giderilmesi, aktif

karbon üretimi, tüketimi ve Türkiye yönüyle uygulama alanları incelenmiştir.

Tablo 1. Literatür araştırmasına ait incelenen yayınlara ait bilgiler

Yıl	Makale sayısı	Yüzelik dağılım %	Yıl	Makale sayısı	Yüzelik dağılım %
2021	7	3.17	2009	13	5.88
2020	16	7.24	2008	10	4.52
2019	14	6.33	2007	10	4.52
2018	17	7.69	2006	8	3.62
2017	11	4.98	2005	4	1.81
2016	15	6.79	2004	4	1.81
2015	12	5.43	2003	5	2.26
2014	18	8.14	2002	4	1.81
2013	11	4.98	2001	1	0.45
2012	15	6.79	2000	3	1.36
2011	10	4.52	Toplam	221	100
2010	13	5.88			

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Türkiye'nin aktif karbon ithalatının 10.868 ton ve 16.607.131 dolar düzeyinde olduğu, ithalatın 50 farklı ülkeden gerçekleştirildiği ve en büyük tedarikçi ülkenin toplam ithalatın %25,52'sini karşıladığı belirlenmiştir. En yaygın kullanılan GTİP/HS kodunun 3802109000 olduğu ve en yüksek ithalat hacmine Mart 2012'de ulaşıldığı rapor edilmiştir. Türkiye'ye giren aktif karbon ürünleri çoğunlukla kömür bazlı, fizikokimyasal yöntemlerle üretilmiş ve Çin menşeli toz formdaki ürünler olup; başlıca kullanım alanları çevre koruma, su arıtma, kimya ve altın endüstrisidir. İhracat verilerine göre Türkiye'de 13 aktif karbon ihracatçısı bulunmakta; toplam 721 tonluk 20 sevkiyat gerçekleştirilmiş olup, tek bir sevkiyatın 113 ton olduğu bildirilmiştir. 2025 yılı, 4'ten fazla sevkiyat yapılan ve toplam 215 tonluk ihracatla en yüksek miktara ulaşılan yıl olarak öne çıkmaktadır. Ortalama ihracat miktarı 55 ton olup, ihracat 10 farklı ülkeye yapılmıştır.

Literatür taramasında Google Scholar, Web of Science, YÖK Tez veri tabanlarında 2000–2020 yılları arasında 378 tez ve 222 makale olmak üzere toplam 600 çalışma belirlenmiş; bunların 49'u konu dışı olduğu için elenmiş ve yaklaşık 400 çalışma değerlendirmeye alınmıştır. İncelenen çalışmaların 42'si doktora, 285'i yüksek lisans ve 2'si tıp alanına aittir. Bu yayınlarda biyokütle, kömür, kabuk, tohum, odun ve karışık atıklardan üretilen aktif karbonların BET yüzey alanı, iyot sayısı, toplam gözenek hacmi (V_t), mikrogözenek (V_{mic}), mezogözenek hacmi (V_{meso}) ve pH_{pzc} gibi temel fizikokimyasal parametreleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Türkiye'de aktif karbon kullanım alanlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen araştırmalara göre, hammaddelere bağlı olarak farklı formlarda kullanım söz konusudur: Bitümlü kömür bazlı granüler aktif karbon su arıtımında; Hindistan cevizi kabuğu bazlı toz aktif karbon yüzme havuzları ve iklimlendirme sistemlerinde; linyit ve taşkömürü bazlı pelet aktif karbon ise altın ekstraksiyonu, adsorpsiyon ve hava temizleme uygulamalarında tercih edilmektedir. Kullanım alanları 11 ana grupta sınıflandırılmıştır: (1) su ve atıksu arıtma, (2) gıda endüstrisi, (3) altın ekstraksiyonu, (4) kimya sanayi, (5) eczacılık, (6) hava temizleme sistemleri, (7) petrol sanayi, (8) sivil savunma ve nükleer ürün endüstrisi, (9) kozmetik, kişisel bakım ürünleri (10) otomotiv sanayi ve (11) diğer uygulamalardır.

Tablo 2. Aktif karbon uygulama alanlarının sınıflandırması

Uygulama Alanları	
1	Su/atıksu arıtma (kanalizasyon arıtma,yüzme havuzları, akvaryumlar,gölet dahil,Aritma,suların temizlenmesi ,su şartlandırma)
2	Gıda (içecek,yiyecek,şeker renk değişikliği,gıda katkı maddesi, gres renk değişikliği,gliserin renk giderimi,karamelli renk giderici,yenilenebilir yağlar)
3	Altın arıtma (altın geri kazanımı,meden, kaplama)
4	Kimya (şolvent geri kazanımı,kükürt giderme ve denitrifikasyon,azot jeneratörü,koku giderme)
5	İlaç (ilaç suyu,tıbbi enjeksiyon,eczacılık)
6	Hava temizleme (gaz arıtma,atık yakma, hava ayırma ekipmanı,atık gaz temizleme,baca gazı arıtımı)
7	Petrol
8	Sivil savunma sanayi, nükleer sanayi
9	Kişisel bakım ürünleri,kozmetik
10	Sigara-duman/otomobil
11	Diğerleri

3.1. Adsorpsiyon Çalışmalarında Deneysel Verilerin Değerlendirilmesi

Adsorpsiyon denge izoterm çalışmaları için pek çok izoterm modeli geliştirilmiştir. Adsorpsiyon verilerini değerlendirmek için Henry yasası, Langmuir, Temkin, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, Redlich–Peterson ve Brunauer–Emmett–Teller gibi çeşitli izoterm modelleri kullanılır. Bu modeller içinde Langmuir, Freundlich ve Temkin izoterm modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Langmuir tarafından adsorpsiyon işlemi için genel bir izoterm denklemi türetilmiştir.

Bu izoterm kimyasal adsorpsiyon için türetilmesine karşın daha çok tek tabakalı fiziksel adsorpsiyon işlemini temsil eder. Langmuir izotermi şu varsayımlara dayanır: Adsorpsiyon tek tabakalı kaplamanın ötesine geçmez. Bütün adsorpsiyon yöreleri eşdeğerdir ve yüzey mikroskopik düzeyde mükemmel derecede düzgündür. Belli bir yörede adsorplanacak bir molekülün tutunma yeteneği komşu yörelerin dolu ya da boş olmasından bağımsızdır. Freundlich tarafından heterojen katı yüzeylerindeki çok tabakalı adsorpsiyonlarda kullanılmak için bir izoterm denklemi türetilmiştir. Temkin izoterm modeli adsorbent yüzeyinin aynı cinsten olduğunu kabul ederek, tabakadaki tüm moleküllerin adsorpsiyon ısısının yüzeyin kaplanmasıyla doğrusal bir şekilde azalacağını öne sürmüştür. Dubinin-Radushkevich izotermi diğer izotermilerden farklı olarak adsorpsiyonun fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında ortalama adsorplama enerjisinin hesaplanmasıyla ilgili bilgi verir.

Adsorpsiyon kinetik çalışmaları, kirletici maddelerin adsorpsiyon oranını ve dengeye ulaşmak için gereken süreyi belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Adsorpsiyon prosesinin kinetiğini analiz edebilmek için çeşitli modeller kullanılmaktadır en yaygın kullanılan kinetik modeller sözde (yalancı) birinci derece kinetik model, sözde (yalancı) ikinci derece kinetik model ve partikül içi difüzyon kinetik modelidir. Lagergren'in sözde birinci derece kinetik model denklemi adsorpsiyon kapasitesine dayanan adsorpsiyon oranını tanımlayan bilinen en eski eşitliktir (Dobay, 2020). Sözde ikinci dereceden kinetik model çözünen madde adsorpsiyon oranının adsorbent üzerindeki bölgelerle orantılı olduğunu varsaymaktadır (Koyuncu, 2021). Reaksiyon hızı, adsorbent yüzeyinde tutulan miktarına bağlıdır ve itici kuvvet, adsorbentteki mevcut aktif alanların sayısı ile orantılıdır. Bu model, mevcut yüzey alanlarına göre tutulma oranının ikinci derece olduğunu varsaymaktadır. Partikül içi difüzyon modeli adsorbentin fiziksel özellikleri, çözeltinin başlangıç

konsantrasyonu, sıcaklık, karıştırma hızı faktörlere bağlıdır (Lagergren, 1898).

Adsorpsiyon termodinamiği çalışmalarında elde edilen deneysel veriler Gibbs serbest enerji değişimi (ΔG°), entalpi değişimi (ΔH°) ve entropi değişimi (ΔS°) gibi termodinamik parametreleri belirlemek için kullanılmaktadır. Bu parametrelerden Gibbs serbest enerji değerlerine göre adsorpsiyonun kendiliğinden yada farklı etkilere bağlı gerçekleştiği, entropi değerlerine göre adsorbent ve adsorbat arasındaki affinitenin belirlenmesi ve entalpi değerlerine göre adsorpsiyon ile giderimin endotermik veya ekzotermik bir proses olduğu belirlenmektedir. Bu çalışmada çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir yere sahip olan aktif karbon üretimi, uygulamaları ve tüketim durumu Türkiye bakış açısıyla değerlendirilmiştir.

3.2. Adsorpsiyon Prosesinde Çalışma Koşullarının Etkisi

Boyar madde başlangıç konsantrasyonunun adsorpsiyon üzerindeki etkisi

Başlangıç boya konsantrasyonu ve adsorban yüzeyindeki aktif bölgelerin etkisi karmaşık bir şekilde ilişkilidir. Genel olarak, başlangıç boya konsantrasyonu arttırıldığında boya uzaklaştırma yüzdesinde bir azalma olur. Bu, boya uzaklaştırma sırasında adsorban yüzeyindeki adsorpsiyon bölgelerinin doyunlaşmasından kaynaklanmaktadır. Aksine, başlangıç boya konsantrasyonu arttırıldığında adsorpsiyon kapasitesi artar, çünkü başlangıçtaki yüksek boya konsantrasyonunda tüm boya kütlelerinin üstesinden gelmek için önemli bir itici güç vardır. Bu durum öncelikle başlangıçtaki temas süresinde mevcut olan ve zamanla adsorbat tarafından kademeli olarak doldurulan çok sayıda boş bölgeden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, adsorban yüzeyindeki adsorbat molekülleri ile çözeltideki adsorbat

arasındaki itici kuvvetler, kalan boş bölgelerin doldurulmasını çok daha zorlaştırmaktadır. Daha fazla boya molekülünün adsorbe edilmesi gerektiğinden, daha yüksek başlangıç konsantrasyonu için dengeye ulaşmak için daha uzun bir temas süresi gereklidir. Daha yüksek başlangıç boya konsantrasyonu adsorpsiyonu, itici kuvvetin yanı sıra sıvı ve katı temas arasındaki çarpışmaların sıklığından da etkilenmektedir. Ayrıca, adsorbat moleküllerinin sınır tabakası etkisini aşması nedeniyle iç gözeneklerde adsorban difüzyonu meydana gelmektedir. Aktif karbon kullanılarak atıksu sistemlerinden maksimum boya konsantrasyonu giderimine yönelik çalışmalara göre, yüksek boya konsantrasyonlarında neredeyse tam tutunma bölgesi kapsamı nedeniyle, renk kaybı yüzdesinin artan boya konsantrasyonu ile azaldığı açıktır.

Sıcaklık değişiminin boya adsorpsiyonu üzerindeki etkisi

Birçok araştırma çalışması, adsorpsiyon kapasitesinin büyük ölçüde reaksiyon sıcaklığına bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Gerçek ortamı taklit etmek için, birçok adsorpsiyon reaksiyonu tipik olarak ortam sıcaklığında (25 °C) gerçekleştirilir. Adsorpsiyon süreci, adsorpsiyon bölgelerinin sayısı sıcaklık artışıyla arttığında endotermiktir. İşlem sıcaklığı yükseldikçe adsorpsiyon için daha fazla aktif bölge olduğu göz önüne alındığında, boya molekülleri daha hareketli hale gelir. Ek olarak, sıcaklık arttıkça adsorpsiyon kapasitesinde azalma olan ve ekzotermik bir adsorpsiyon sürecini gösteren birkaç başka adsorpsiyon sistemi de vardır. Örnek çalışmalarda sıcaklık 40 °C'nin altında olduğunda, adsorbanın adsorpsiyon kapasitesi sıcaklık yükseldikçe artar ve daha fazla boyayı adsorbe etmesini sağlar. Bununla birlikte, daha yüksek sıcaklıklarda moleküler hareketliliğin artması nedeniyle, daha fazla boya adsorpsiyon bölgelerini işgal edebilir ve adsorpsiyon kapasitesini azaltabilir. Ayrıca, daha yüksek sıcaklıklar, düzenli aktif karbonun

yüzeyindeki aktif adsorpsiyon bölgelerinin tahrip olmasına neden olabilir, bu durum adsorbat ile adsorpsiyon bölgeleri arasındaki etkileşimi azaltır. Aktif karbon üzerindeki negatif zeta potansiyeli, bu durumda boya giderme işleminin daha yüksek sıcaklıklarda endotermik olduğunu göstermiştir. Bu bulgulara dayanarak, mezogözenekli karbon bazlı zararlı boyaların giderilmesinin hem endotermik hemde ekzotermik nitelikte olabileceğini gösterilmiştir.

pH değişiminin boya madde adsorpsiyonu üzerindeki etkisi

Boya adsorpsiyonu için pH faktörü de önemli bir parametredir. Başlangıç pH'ı, adsorban yüzey yükünü, adsorbanın aktif bölgelerindeki fonksiyonel grupların ayrışmasını, iyonlaşma derecesini ve hatta boya moleküllerinin kimyasal yapısını değiştirebildiği için adsorpsiyon olayını büyük ölçüde etkiler. pH parametresinin etkisini kontrol etmek için genellikle pH 4-11 aralığında incelenir. Asidik boya adsorpsiyonları, pH 8-10 arasında olan çözeltilerde en yüksektir. Adsorpsiyon hızı, aktarılan boya moleküllerinin elektrostatik doğasını tanımlayan ortamın pH'ına göre değişir. pH yükseldikçe, pozitif yüklü boya ile adsorban yüzeyi arasındaki elektrostatik çekim azalır, bu durum adsorpsiyon derecesini artırabilir. Bir adsorbanın sıfır yük noktası (pH_{ZPC}), toplam parçacık yüzeyinin net yüzey yükünün net elektriksel nötr sahip olduğu pH değerini belirleyen önemli bir özelliktir. pH_{ZPC} 'den daha düşük bir pH değerine sahip bir çözeltide, pozitif yüklü adsorpsiyon bölgeleri ile anyonik boya molekülleri arasında elektrostatik çekim gerçekleştiği ve böylece boya adsorpsiyonunu iyileştirildiği belirlenmiştir.

Adsorban dozunun boya adsorpsiyonu üzerindeki etkisi

Adsorbent dozu, aktif adsorpsiyon ve enzimatik bölgelerin sayısını etkileyebildiği için, atık sulardan boya kirleticilerinin adsorpsiyonunu etkileyen çok önemli bir parametredir. Adsorbent miktarının ve adsorbent yüzeyindeki adsorpsiyon bölgelerinin sayısının artması, genel olarak boya giderim yüzdesini artırır. Adsorbent dozundaki varyasyonlar, boya kirleticilerinin adsorpsiyon verimliliğini artırır. Adsorbent dozu arttıkça, serbest yüzey aktif bölgelerinin sayısı da artar ve sonuç olarak adsorpsiyon verimliliği artar. Ancak bazı durumlarda, adsorbent miktarının artırılması, adsorpsiyon kapasitesi üzerinde zararlı bir etkiye sahip olabilir; bunun nedeni, adsorbent dozu arttıkça aktif olan adsorbent bölgelerinin azalmaya başlamasından dolayıdır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma, aktif karbonun farklı endüstrilerde kullanılan zararlı boyar maddelerin uzaklaştırılması hakkında bilgi sağlamayı amaçlamaktadır. Aktif karbon sentezi, fiziksel ve kimyasal aktivasyon yöntemleri, adsorpsiyon uygulamaları ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Genel olarak, aktif karbon, atıksu arıtma sistemlerindeki potansiyel uygulamaları nedeniyle yeni nesil inorganik malzemeler olarak kabul edilmektedir. Belirgin mezogözenekli yapısı, düzenli veya sıralı gözenek özellikleri, karbon içeriği ve biyoyumluluğu, aktif karbonu boya uzaklaştırma tekniklerinde mükemmel bir adsorban yapmaktadır. Aktif karbonun birçok araştırma çalışmasında adsorpsiyon süreçleri için uygun bir malzeme olduğunu gösterilmiş olsa da, yaygın endüstriyel kullanımlar için etkili ve uygun fiyatlı aktif karbon hazırlama tekniklerinin bulunması için kapsamlı ve ayrıntılı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Aktif karbonun

hazırlanmasının, diğer ticari olarak temin edilebilen adsorbanlarla rekabet edebilmesi için uygun fiyatlı olması gereklidir. Ele alınması gereken bir diğer önemli bilgi açığı, laboratuvar ortamındaki yapay olarak hazırlanan atıksulara kıyasla daha karmaşık yapıdaki gerçek endüstriyel atıksulardan boyar maddeleri uzaklaştırmada aktif karbonun çok fazla etkili olduğudur. Bu nedenle, endüstriyel sektörlerde sürekli uygulanabilirlik ve ölçeklenebilirlik için, gerçek atıksularda adsorbanların adsorpsiyon verimliliğini pratik olarak iyileştirmeye yönelik araştırmaları teşvik etmek ve yükseltmek önemlidir. Aktif karbonun yeniden kullanım için rejenerasyonu üzerine az sayıda araştırma rapor edilmiş olsa da, rejenerasyon çalışmalarının kapsamlı bir analizi, endüstriyel ölçeklendirmedeki uygulamaları için çok önemli bilgiler sağlayacaktır. Endüstriyel uygulamalar için maliyet etkinliğini belirlemek için, çeşitli çalışmalar yoluyla adsorpsiyon/desorpsiyon döngüsü sırasında aktif karbonun kararlılığını değerlendirmek de gereklidir. Bu nedenle, mevcut yöntemler genellikle güçlü asit ve baz kullanımı, yüksek ısıl işlemi ve diğer aktive edici maddeler gerektirdiğinden, aktif karbon modifikasyonunun benzersiz, basit, ekonomik ve çevre dostu yollarının geliştirilmesi teşvik edilmektedir. Ayrıca, kullanılmış ve kullanılmamış aktif karbon bazlı adsorbanların bertarafı için yaşam döngüsü analizi ve ekotoksikolojik değerlendirmeyi içeren farklı araştırma projeleri gereklidir. Tüm bu veriler, aktif karbonun su ve atıksu arıtma araştırmaları için hala bir fırsat alanı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, sentezi, karakterizasyonu ve çevresel kirleticilerin giderilmesinde kullanımı konusunda sürekli çalışmalar yapılması çok önemlidir.

Literatür analizleri, tarımsal biyokütle ve özellikle kabuk/çekirdek bazlı hammaddelerden üretilen aktif karbonların yüksek performans sergilediğini göstermiştir. Bu grupta BET yüzey alanı değerleri 1500–5000 m²/g aralığında değişmekte

olup, en yüksek uzaklaştırma verimi çekirdek/kabuk grubunda elde edilmiştir. Langmuir yüzey alanı ve iyot sayısı bakımından taş ve kabuk grupları öne çıkarken, mikrogözenek hacmi (V_{mic}) ve maksimum adsorpsiyon kapasitesi (Q_0) değerleri kabuk grubunda daha yüksek bulunmuştur. Hammadde dağılımına göre çalışmaların %74'ü taş/kabuk/kabuk, %17'si çekirdek (özellikle kayısı), %14'ü çay/yaprak (atık siyah çay), %20'si bitki artıkları (fıstık/yer fıstığı), %15'i taş kömürü, %8'i şeker pancarı ve %7'si atıksu arıtma çamuru gibi karışık gruplara dayanmaktadır.

Aktivasyon yöntemleri açısından kimyasal ajanlar (KOH, H_3PO_4 , $ZnCl_2$) ve fiziksel yöntemler (CO_2 , buhar, ısı işlem, N_2 atmosferinde fırınlama) karşılaştırılmıştır. Kimyasal aktivasyonun daha yüksek yüzey gelişimi sağladığı; fiziksel aktivasyonun ise daha kontrollü gözenek yapısı ve temiz yüzey kimyası sunduğu belirlenmiştir. En yaygın kimyasal ajan $ZnCl_2$, fiziksel ajan ise N_2 olarak rapor edilmiştir. Bulgular, hammadde seçimi ve aktivasyon koşullarının aktif karbon performansını belirleyen temel faktörler olduğunu ortaya koymaktadır.

Türkiye'de aktif karbon kullanıcılarına yönelik yaklaşık 400 şirketin incelendiği araştırmada, resmi bilgiler ve kullanım alanları 11 grup altında sınıflandırılmıştır. 200 şirket üzerinden yapılan değerlendirmede kullanım oranları; %37.3 ile G1 (su arıtma), %18.9 ile G6 (hava arıtma) ve %14.8 ile G4 (kimya endüstrisi) olarak belirlenmiştir. Anket kapsamında 6 soru yöneltilmiş ve 2019 yılı için fiili tüketim miktarları ile 2025 yılı için öngörülen ihtiyaç ve ihracat potansiyeli analiz edilmiştir. Sonuçlara göre G1 grubu 371,6 ton (su arıtma) ve 309.76 ton (hava arıtma) ile en yüksek tüketim değerlerine sahiptir. Türkiye'ye giren toplam aktif karbon miktarı yaklaşık 13.000 ton olup, bunun %42.87'si su arıtma ve %35.73'ü hava arıtma uygulamalarında kullanılmaktadır. EKAP verilerine göre 2017–2020 yılları arasında Erzurum, Tekirdağ, Eskişehir ve Ankara gibi illerde kamu tarafından kömür ve odun bazlı pelet aktif

karbon alımları gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 120 şirketin yıllık toplam kullanımının 400 ton civarında olduğu; genel ulusal talebin ise yıllık yaklaşık 12.000 ton düzeyinde bulunduğu tahmin edilmektedir. 2010 yılında ithalat miktarı yaklaşık 2.600 ton olup toplam değeri 6.421 dolar, birim fiyatı 1.31 dolar ve sevkiyat başına ortalama değer 38.450 dolar olarak rapor edilmiştir. Küresel ihracat sıralamasında Türkiye 4.898.828 tonluk (%1.2) ihracat ile 11. sırada yer almakta; ihracat miktarları şehir bazında kilogram cinsinden raporlanmaktadır. 2023 yılında Türkiye, toplamda 17.443.800 kilogram (yaklaşık 17.444 ton) aktif karbon ithal etmiştir. Bu ithalatın toplam değeri 36.7 milyon doların üzerindedir. Başka bir kaynakta 2023 yılı ithalatının 17.000 tonun üzerinde olduğunu teyit etmektedir. Genel olarak sonuçlar, kabuk/çekirdek bazlı hammaddelerin ve uygun aktivasyon yöntemlerinin yüksek performanslı adsorbent geliştirilmesinde kritik rol oynadığını; Türkiye’de aktif karbonun özellikle su ve hava arıtma sektörlerinde yoğunlaştığını ve artan talep doğrultusunda stratejik önemini sürdürdüğünü göstermektedir. Bu bulgular, Türkiye’de aktif karbonun hem dış ticaret hem de akademik üretim ve endüstriyel kullanım açısından stratejik bir malzeme olduğunu ve özellikle çevresel uygulamalarda artan bir öneme sahip bulunduğunu göstermektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışma, Türkiye’de daha etkin aktif karbon üretimi için üretim kapasitesinin artırılması ve araştırma verilerinin çoğaltılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Mevcut literatürde bazı üretim süreçlerine ilişkin sayısal özellikler ve performans parametrelerinin yetersiz raporlandığı belirlenmiş olup, bu durum daha fazla deneysel çalışma ve veri temelli analiz ihtiyacını göstermektedir. Ayrıca, aktif karbonun satın alma maliyetinin üretim maliyetinden yüksek olması, yerli ve pilot ölçekli üretim tesislerinin kurulmasını ekonomik açıdan rasyonel kılmaktadır.

Aktif karbon ile adsorpsiyon prosesi; pestisitler, boyar maddeler ve çeşitli organik kirleticilerin sulu çözeltilerden uzaklaştırılmasında en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. 2019 yılı verilerine göre toplam 15.000 ton aktif karbon tüketiminin %37.3'ü su ve atıksu arıtma, %19'u hava arıtma ve %15'i kimya endüstrisinde gerçekleşmiştir. Türkiye, 2023 yılında 17 bin tonun üzerinde aktif karbon ithal etmiştir. Ülkedeki toplam yıllık üretim miktarı ise bu rakamın oldukça altındadır ve net bir toplam üretim verisi kamuya açık kaynaklarda düzenli olarak yayımlanmamaktadır. Aynı dönemde aktif karbonun kilogram fiyatının bir yıl içinde iki katına çıkması, arz-talep dengesinde üretim kapasitesinin yetersiz kaldığını göstermektedir. Türkiye, aktif karbon üretiminde ithalatçı bir konumdadır ve yerli üretim miktarı, talebi karşılamaktan uzaktır. 2023 yılında Türkiye'nin aktif karbon ihracatı, ithalatın yanında çok düşük bir rakam olan sadece 349 ton olarak gerçekleşmiştir.

Türkiye'nin yıllık yaklaşık 44 milyon kg (400–500 ton) aktif karbon ithal ettiği dikkate alındığında, ülkenin mevcut linyit, taş kömürü ve bitümlü kömür rezervleri yerli aktif karbon üretimi için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu kaynakların çevre dostu ve ekonomik yöntemlerle değerlendirilmesi, hem dışa bağımlılığı azaltacak hem de ülke ekonomisine katma değer sağlayacaktır. Fındık kabuğu ve kayısı çekirdeği gibi yerli kaynakları kullanarak üretimi artırmaya yönelik yeni tesislerin faaliyete geçmesiyle birlikte, gelecekte dışa bağımlılığın azaltılması hedeflenmektedir. Sonuç olarak, yerli hammadde potansiyeline dayalı, yüksek performanslı ve sürdürülebilir aktif karbon üretiminin artırılması stratejik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aldemir, A., Turan, A., Kul, A.R., Koyuncu, H., (2023). Comprehensive investigation of Basic Red 46 removal by pinecone adsorbent: experimental, isotherm, kinetic and thermodynamic studies. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(3), 2601-2622
- Angin, D., (2014a). Utilization of activated carbon produced from fruit juice industry solid waste for the adsorption of Yellow 18 from aqueous solutions. *Bioresource Technology*, 168, 259–266.
- Aslan, S., (2021). Çörek otu posasının aktif karbon üretiminde değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33, 193–201.
- Aygün, A., Yenisoy-Karakaş, S., Duman, I., (2003). Production of granular activated carbon from fruit stones and nutshells and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties. *Microporous Mesoporous Materials*, 66, 189–195.
- Azizian, S., Bagheri. M., (2014). Enhanced adsorption of Cu^{2+} from aqueous solution by Ag doped nano-structured ZnO. *Journal of Molecular Liquids*, 196, 198–203.
- Başar, C.A., (2006). Applicability of the various adsorption models of three dyes adsorption onto activated carbon prepared waste apricot. *Journal of Hazardous Materials*, 135, 232–241.
- Crini, G., (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97, 1061–1085.
- Cuhadaroglu, D., Uygun, O.A., (2008). Production and characterization of activated carbon from a bituminous

- coal by chemical activation. *African Journal of Biotechnology*, 7, 3706–3713.
- Cui, L., W. Xu, X. Guo, Y. Zhang, Q. Wei, and Du. B., (2014). Synthesis of Strontium hydroxyapatite embedding ferroferric oxide nano-composite and its application in Pb^{2+} Adsorption. *Journal of Molecular Liquids*, 197, 40–47.
- Demiral, H., Baykul, E., Gezer, M.D., Erkoç, S., Engin, A., Baykul, M.C., (2014). Preparation and characterization of activated carbon from chestnut shell and its adsorption characteristics for lead. *Separation Science and Technology*, 49, 2711–2720.
- Demirbas, E., Dizge, N., Sulak, M.T., Kobya, M., (2009). Adsorption kinetics and equilibrium of copper from aqueous solutions using hazelnut shell activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 148, 480–487.
- Depci, T., Kul, A.R., Onal, Y., Disli, E., Alkan, S., Turkmenoglu, Z.F., (2012b). Adsorption of crystal violet from aqueous solution on activated carbon derived from Gölbaşı lignite. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 48, 253–270.
- Dobay, A., et al. (2020). Potential use of deep learning techniques for postmortem imaging. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, 16(4), 671–679.
- Dural, M.U., Cavas, L., Papageorgiou, S.K., Katsaros, F.K., (2011). Methylene blue adsorption on activated carbon prepared from *Posidonia oceanica* (L.) dead leaves: Kinetics and equilibrium studies. *Chemical Engineering Journal*, 168, 77–85.
- El-Bindary, A.A., El-Sonbati, A.Z., Al-Sarawy, A.A., Mohamed, K.S., and Farid, M.A. (2014). Adsorption and

thermodynamic studies of hazardous azocoumarin dye from an aqueous solution onto low cost rice straw based carbons. *Journal of Molecular Liquids*, 199, 71–78.

Erdoğan, F.O., Kopaç, T., Doğu, G., Doğu, T., (2010). Acetone adsorption capacities of carbon based materials. Third National Catalysis Conference, Zonguldak, Türkiye, 1999–2000.

Ferreira, A. M., Coutinho, J. A. P., Fernandes, A.M. and Freire. M.G., (2014). Complete removal of textile dyes from aqueous media using ionic-liquid-based aqueous two-phase systems. *Separation and Purification Technology*, 128, 58–66.

Gokce, Y., Aktas, Z., (2014). Nitric acid modification of activated carbon produced from waste tea and adsorption of methylene blue and phenol. *Applied Surface Science*, 313, 352–359.

Gusain, D., Bux, F., and Sharma. Y.C., (2014). Abatement of chromium by adsorption on nanocrystalline zirconia using response surface methodology. *Journal of Molecular Liquids*, 197, 131–141.

Gupta, V.K., Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal — A Review. *Journal of Environmental Management*, 90, 2313–2342.

Gümüş, A., Kul, A.R., Aldemir, A., (2025a). Production, import and consumption distribution of activated carbon (AC) in Türkiye. 8th International Eurasian Conference on Biological and Chemical Sciences (EurasianBioChem 2025), Ankara, Turkey, 17 - 19 December 2025, vol.1, no.1, pp.1

Gümüş, A., Kul A.R., Aldemir, A. (2025b). An extensive research on activated carbon (AC) for preparation,

characterization and improvement of properties with modification methods. 8th International Eurasian Conference on Biological and Chemical Sciences (EurasianBioChem 2025), Ankara, Turkey, 17 - 19 December 2025, 1, no.1, pp.1-2.

Hao, Y.F., L.G. Yan, H.Q. Yu, K. Yang, S.J. Yu, R.R. Shan, and Du., B., (2014). Comparative study on adsorption of basic and acid dyes by hydroxy-aluminum pillared bentonite. *Journal of Molecular Liquids*, 199, 202–207.

Heidarinejad, Z., Dehghani, M.H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., Sillanpää, M., (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 393–415.

Ho, Y.S., and G. McKay. (1998). Kinetic models for the sorption of dye from aqueous solution by wood. *Process Safety and Environmental Protection*, 76, 183–191.

Hosseini Nia, R., M. Ghaedi, and A. M. Ghaedi. (2014). Modeling of Reactive Orange 12 (RO 12) adsorption onto gold nanoparticle-activated carbon using artificial neural network optimization based on an imperialist competitive algorithm. *Journal of Molecular Liquids*, 195, 219–229.

Jawad, A.H., Kadhum, A.M. and Ngoh, Y.S., (2018). Applicability of dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*) peels as low-cost biosorbent for adsorption of methylene blue from aqueous solution: Kinetics, equilibrium and thermodynamics studies. *Desalination and Water Treatment*, 109, 231–240.

Karacan, F., Ozden, U., Karacan, S., (2007). Optimization of manufacturing conditions for activated carbon from Turkish lignite by chemical activation using response

- surface methodology. *Applied Thermal Engineering*, 27, 1212–1218.
- Kopac, T., Kırca, Y., (2020). Effect of ammonia and boron modifications on the surface and hydrogen sorption characteristics of activated carbons from coal. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 10494–10506.
- Kul, A.R., H. Koyuncu, A. Turan, and A. Aldemir., (2023). Comparative research of isotherm, kinetic, and thermodynamic studies for neutral red adsorption by activated carbon prepared from apple peel. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(383), 1–26.
- Kula, I., Uğurlu, M., Karaoğlu, H., Çelik, A., (2008). Adsorption of Cd(II) ions from aqueous solutions using activated carbon prepared from olive stone by ZnCl₂ activation. *Bioresource Technology*, 99, 492–501.
- Kyzas, G.Z., and Kostoglou. M., (2014). Green adsorbents for wastewaters: A Critical Review. *Materials*, 7, 333–364.
- Kyzas, G.Z., Fu, J., and Matis, K.A. (2013). The change from past to future for adsorbent materials in treatment of dyeing wastewaters. *Materials*, 6, 5131–5158.
- Langergren, S., and Svenska. B.K., (1898). Zur Theorie der Sogenannten Adsorption Geloester Stoffe. *Veternskapsakad Handlingar* 24, 1–39.
- Lemraski, E.G., and Kargar. E., (2014). Standard Gibbs Energy of adsorption and surface properties for ionic liquids binary mixtures. *Journal of Molecular Liquids*, 195, 17–21.
- Li, P., Du, Z., Ma, X., Wang, G., and Li. G., (2014). Synthesis, Adsorption and aggregation properties of trisiloxane

- room-temperature ionic liquids. *Journal of Molecular Liquids*, 192, 38–43.
- Özdemir, M., Durmuş, Ö., Şahin, Ö., Saka, C., (2016). Removal of methylene blue, methyl violet, rhodamine B, alizarin red, and bromocresol green dyes from aqueous solutions on activated cotton stalks. *Desalination and Water Treatment*, 57, 18038–18048.
- Ozer, A., Tumen, F., (2003). Cd (II) Adsorption from aqueous solution by activated carbon from sugar beet pulp impregnated with phosphoric acid by activated carbon from sugar beet pulp. *Fresenius Environmental Bulletin* 12(9):1050-1058.
- Qian, L., Ma, M., and Cheng. D., (2014). The effect of water chemistry on adsorption and desorption of U(VI) on nano-alumina. *Journal of Molecular Liquids*, 197, 295–300.
- Pauletto, P.S., J.O. Gonçalves, J.O. Pinto, L.A.A., Dotto, G.L., and Salau. N.P.G., (2020). Single and competitive dye adsorption onto chitosan-based hybrid hydrogels using artificial neural network modeling. *Journal of Colloid and Interface Science*, 560, 722–729.
- Sahina, S.C., Aksub, S., (2017). Adsorption of dyes from aqueous textile by-products on activated carbon from *Scenedesmus obliquus*. *Analitical Letters*, 50, 1812–1830.
- Saleh, T.A., Al-Saadi, A.A. and Gupta. V.K., (2014). Carbonaceous adsorbent prepared from waste tires: experimental and computational evaluations of organic dye methyl orange. *Journal of Molecular Liquids*, 191, 85–91.

- Sharif, Y.M., Saka, C., Baytar, O., Şahin, Ö., (2018). Preparation and characterization of activated carbon from sesame seed shells by microwave and conventional heating with zinc chloride activation. *Analitical Letters*, 51, 2731–2744.
- Shamsizadeh, A., Ghaedi, M., Ansari, A., Azizian, S., and Purkait. M.K., (2014). Tin oxide nanoparticle loaded on activated carbon as new adsorbent for efficient removal of malachite green-oxalate: Non-Linear Kinetics and Isotherm Study. *Journal of Molecular Liquids*, 195, 212–218.
- Sulak, M.T., Demirbas, E., and Kobya. M., (2007). Removal of Astrazon Yellow 7GL from aqueous solutions by adsorption onto wheat bran. *Bioresource Technology*, 98, 2590–2598.
- Tang, X., Zhang, Q., Liu, Z., Pan, K., Dong, Y., and Li. Y., (2014). Removal of Cu(II) by loofah fibers as a natural and low-cost adsorbent from aqueous solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 191, 73–78.
- Tayebi, H.-A., Ghanei, M., Aghajani, K., and Zohrevandi. M., (2019). Modeling of Reactive Orange 16 dye removal from aqueous media by mesoporous silica / crosslinked polymer hybrid using RBF, MLP and GMDH neural network models. *Journal of Molecular Structure*, 1178, 514–523.
- Toprak, A., Kopac, T., (2017). Carbon dioxide adsorption using high surface area activated carbons from local coals modified by KOH, NaOH and ZnCl₂ Agents. *International Journal of Chemical Reaction Engineering*. 15, 700.

- Toprakçı, O., Karahan Toprakci, H.A., Okkay, H., (2021). Methylene Blue removal by activated carbon from platanus orientalis leaves. *International Journal of Environmental Geoinformatics*, 8, 283–289.
- Uçar, S., Erdem, M., Tay, T., Karagöz, S., (2015). Removal of lead (II) and nickel (II) ions from aqueous solution using activated carbon prepared from rapeseed oil cake by Na₂CO₃ activation. *Clean Technology Environmental Policy*, 17, 747–756.
- Üner, O., Geçgel, Ü., Kolancılar, H., Bayrak, Y., (2017). Adsorptive removal of Rhodamine B with activated carbon obtained from okra wastes. *Chemical Engineering Communication*, 204, 772–783.
- Uysal, T., Duman, G., Onal, Y., Yasa, I., Yanik, J., (2014). Production of activated carbon and fungicidal oil from peach stone by two-stage process. *Journal of Analytical Applied Pyrolysis*, 108, 47–55.
- Ventura-Camargo, B., and Marin-Morales. M.A., (2013). Azo Dyes: characterization and toxicity — A Review. *Textile and Light Industrial Science and Technology*, 2, 85–103.
- Weber, W.J., and Morris. J.C., (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89, 31–60.
- Woolard, C.D., Strong, J., and Erasmus. C.R., (2002). Evaluation of the use of modified coal ash as a potential sorbent for organic waste streams. *Applied Geochemistry*, 17, 1159–1164.
- Yagmur, E., (2012). Preparation of low cost activated carbons from various biomasses with microwave energy. *Journal of Porous Materials*, 19, 995–1002.

- Yagub, M.T., Sen, T.K. Afroze, S. and Ang. H.M., (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172–184.
- Zhang, Y., Yan, L., Xu, W., Guo, X., Cui, L., Gao, L., Wei, Q., and Du. B., (2014). Adsorption of Pb(II) and Hg(II) from aqueous solution using magnetic CoFe_2O_4 -reduced graphene oxide. *Journal of Molecular Liquids*, 191, 177–182.

**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA BİLİMSEL
ARAŞTIRMALAR**

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com